

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi de la cinemàtica d'una motocicleta de competició al llarg del recorregut de les suspensions

MEMÒRIA

Autor: Pere Sánchez i Roger
Director: Lluís Roger Casals
Convocatòria: Gener 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

L'objectiu d'aquest projecte és obtenir un conjunt de programes informàtics que permetin estudiar la geometria d'una motocicleta de competició de petita cilindrada i la cinemàtica d'aquesta geometria, és a dir, com canvia al llarg del recorregut de les suspensions, i el comportament del sistema de suspensió posterior. A la vegada també es vol que aquests programes tinguin utilitat en el món de la competició i la posada a punt de la moto, que no només tinguin un sentit acadèmic.

Per tal de realitzar aquests programes, s'ha estudiat els paràmetres bàsics de la geometria d'una motocicleta i quina influència tenen sobre el comportament d'aquesta. Seguidament s'ha estudiat els tipus de sistemes de suspensió i el comportament d'aquest i com es poden modelitzar matemàticament. Finalment s'ha proposat un model que simuli la geometria d'una motocicleta: xassís, basculant i sistemes de suspensió. A partir d'aquest model s'han obtingut les equacions del moviment, tant de la moto completa, pel programa de la geometria de la moto, com del sistema de suspensió posterior, pel programa d'anàlisi del sistema de suspensió posterior.

Els dos programes funcionen perfectament, presentant una desviació respecte la mateixa geometria introduïda en Solidworks® de com a màxim un 0,1%. Com a tal podem concloure que els dos programes funcionen i que no hi ha cap error en les equacions del moviment. El programa d'anàlisi del sistema de suspensió posterior permet obtenir la corba de progressivitat, la rigidesa del sistema de suspensió al llarg del desplaçament vertical de la roda, d'un sistema de bieletes del tipus "Pro-link", sistema de suspensió dissenyat inicialment per Honda®, a la vegada que et permet relacionar el desplaçament del amortidor amb el d'un potenciòmetre que estigui ancorat del basculant al xassís, per tal d'obtenir la posició del conjunt molla amortidor durant el funcionament de la motocicleta utilitzant un sistema d'adquisició de dades.

El programa d'anàlisi de la geometria de la moto permet comprovar com afecten els paràmetres imposats com ara les dimensions del xassís als paràmetres de geometria bàsics, a més a més, permet estudiar la geometria de la motocicleta en estat estacionari o moviment rectilini uniforme, durant la frenada quan ja s'ha acabat el transitori del capcineig de les masses suspeses, tota la massa que està aïllada del terra mitjançant els sistemes de suspensió.

D'aquesta forma s'han obtingut un parell d'eines que permeten estudiar la geometria d'una motocicleta de petita cilindrada i el comportament d'aquesta durant alguns dels punts més crítics del seu funcionament, com són les frenades i les acceleracions més fortes.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	5
1.1. Definicions	5
1.2. Simbologia	7
2. PREFACI	12
2.1. Origen del projecte	12
2.2. Requeriments previs	12
3. INTRODUCCIÓ	13
3.1. Objectius del projecte	13
3.2. Abast del projecte	13
4. CINEMÀTICA DE LA MOTOCICLETA	14
4.1. Definició cinemàtica de la motocicleta	14
4.2. La geometria de la motocicleta	15
4.3. L'avanç lineal al terra de la motocicleta	18
4.3.1. Avanç normal de la roda posterior	21
5. SISTEMES DE SUSPENSÍO D'UNA MOTOCICLETA	23
5.1. Nota de l'autor	23
5.2. Introducció	23
5.3. Suspensió anterior	24
5.4. Sistemes de suspensió posteriors	26
5.5. Rigidesa efectiva de la suspensió	27
5.5.1. Suspensió anterior	28
5.5.2. Suspensió posterior	29
5.5.3. Corba de progressivitat	30
5.5.4. La precàrrega	31
6. ESTUDI DE MERCAT	33
7. LLENGUATGE DE PROGRAMACIÓ	35
8. CALCULADOR DE PROGRESSIVITAT	37
8.1. Geometria utilitzada	37

8.2. Model utilitzat	38
8.2.1. Model matemàtic del recorregut del potenciòmetre	41
8.3. Funcionament del programa	42
9. CALCULADOR DE GEOMETRIES	46
9.1. Geometria utilitzada	46
9.2. Model utilitzat	47
9.3. Funcionament del programa	51
9.4. Comparativa dels resultats	55
10. POSSIBLES MILLORES A REALITZAR	60
11. PRESSUPOST	61
12. ANÀLISI D'IMPACTE AMBIENTAL	63
CONCLUSIONS	65
AGRAÏMENTS	67
BIBLIOGRAFIA	68
Referències bibliogràfiques	68
Bibliografia complementària	69

1. Glossari

1.1. Definicions

Altura forquilles: Distància entre el tap superior d'una de les forquilles amb el pla superior de la tija superior

Amortiment efectiu: Amortiment del conjunt molla amortidor de la suspensió equivalent.

Angle d'avanç: Angle de l'eix de la pipa de direcció amb la vertical.

Angle de deriva: Angle entre la direcció de marxa de la roda i el pla de la roda.

Avanç lineal al terra: Distància entre el punt de contacte de la roda anterior amb el pla de la carretera i el punt de intersecció entre l'eix de la pipa de direcció i el pla de la carretera.

Avanç normal posterior: Distància entre el punt de contacte de la roda posterior amb el terra i l'eix de direcció de la moto.

Avanç normal: Distància entre el punt de contacte de la roda anterior amb el pa de la carretera i l'eix de la pipa de direcció.

Batalla: Distància entre els eixos de les dues rodes projectada al pla de la carretera.

Chatter: Oscil·lació intermitent de les forquilles en el pla que conté el vector força de frenada i és perpendicular al terra.

ETC: European Talent Cup

FIM CEV Repsol: Federació Internacional de Motociclisme Campionat d'Espanya de Velocitat

Forquilla: Sistema de suspensió anterior en el qual dos tubs de diferent diàmetre concèntrics i amb moviment relatiu telescòpic entre ells. Dintre d'aquests dos hi ha un conjunt molla amortidor.

Massa no suspesa: Tota aquella massa de la moto que no està aïllada del terra mitjançant sistemes de suspensió.

Massa suspesa: Tota aquella massa de la moto que està aïllada del terra mitjançant sistemes de suspensió.

Motion Ratio: Rati de desplaçaments o velocitats entre el conjunt molla amortidor d'un sistema de suspensió i la roda.

Offset: Distància entre l'eix de la pipa de direcció i un eix paral·lel a aquest i que passa per l'eix de la roda davantera. Aquest pot venir imposat per les forquilles, o per les tiges que aguanten aquestes.

Pipa de direcció: Element cilíndric del xassís que uneix el sistema de direcció amb aquest. L'eix de la pipa coincideix amb l'eix de direcció de la moto.

Potenciòmetre: Aparell de mesura amb l'objectiu de determinar la posició del conjunt molla amortidor durant el funcionament de la motocicleta

Precàrrega: Precompressió de la molla dins del conjunt molla amortidor.

RFME: Real Federació Motociclisme Espanyola

Rigidesa efectiva: Rigidesa del conjunt molla amortidor de la suspensió equivalent.

Sistema antidive: Tipus de suspensió anterior la qual no pateix una compressió del conjunt molla amortidor durant el procés de frenada.

Sistema Pro-link: Tipus de suspensió posterior dissenyat inicialment per Honda®, la qual es basa en un quadrilàter articulat.

SSP300: Supersport 300

Suspensió equivalent: Simplificació matemàtica d'un sistema de suspensió, el qual modelitza aquest com una massa suspesa unida a la massa no suspesa o al terra, si aquesta segona es negligible, mitjançant un conjunt molla amortidor.

Tiges: Conjunt de peces, tija inferior i superior, que uneixen les forquilles a la pipa de direcció.

Wobble: Oscil·lació del tren davanter al voltant de l'eix de direcció

WSSP300: WorldSupersport 300

1.2. Simbologia

<i>Altura forquilles</i>	H_f
<i>Angle d'avanç:</i>	ε
<i>Angle del segment S1 del basculant amb l'horitzontal:</i>	φ_b
<i>Angle del segment T3 del basculant amb la vertical:</i>	φ_t
<i>Angle entre el segment X2 del xassís i la vertical</i>	δ
<i>Angle entre els segments del basculant S1 i S2:</i>	Sa_2
<i>Angle entre els segments del basculant S1 i S3:</i>	Sa_1
<i>Angle entre els segments del basculant S2 i S3:</i>	Sa_3
<i>Angle entre els segments del potenciòmetre P1 i del basculant S1 :</i>	Pa_1
<i>Angle entre els segments del potenciòmetre P1 i P2:</i>	Pa_2
<i>Angle entre els segments del potenciòmetre P2 i del basculant S1:</i>	Pa_3
<i>Angle entre els segments del triangle T1 i T2:</i>	Ta_2
<i>Angle entre els segments del triangle T1 i T3 :</i>	Ta_1
<i>Angle entre els segments del triangle T2 i T3:</i>	Ta_3
<i>Angle entre els segments del xassís X1 i X2:</i>	Xa_2
<i>Angle entre els segments del xassís X1 i X3:</i>	Xa_1
<i>Angle entre els segments del xassís X2 i X3:</i>	Xa_3
<i>Angle que forma el segment b de la bieleta amb l'horitzontal:</i>	θ_b
<i>Avanç lineal al terra:</i>	a
<i>Avanç normal posterior:</i>	b_n
<i>Avanç normal:</i>	a_n

<i>Batalla:</i>	p
<i>Carrera del conjunt molla amortidor:</i>	C
<i>Coeficient d'amortiment del amortidor:</i>	c
<i>Coeficient d'amortiment efectiu anterior:</i>	C_f
<i>Coeficient d'amortiment efectiu posterior:</i>	C_p
<i>Desplaçament vertical de l'eix de la roda:</i>	y_c
<i>Distància entre l'eix del basculant i el punt d'intersecció del segment X2 amb la recta perpendicular a aquest i que passa pel punt d'ancoratge de l'amortidor al xassís:</i>	X_m
<i>Distància entre l'eix del basculant i el punt d'intersecció del segment X2 amb la recta perpendicular a aquest i que passa pel punt d'ancoratge de les bieletes al xassís:</i>	X_b
<i>Distància de l'enllaç basculant-potenciòmetre al eix de la roda</i>	P_2
<i>Distància de l'enllaç xassís-basculant al enllaç basculant-potenciòmetre</i>	P_1
<i>Distància entre el punt d'ancoratge de les bieletes al xassís fins al punt d'intersecció de la recta perpendicular a X2 que passa pel punt d'ancoratge de les bieletes al xassís:</i>	Y_b
<i>Distància entre el punt d'ancoratge del amortidor al xassís fins al punt d'intersecció de la recta perpendicular a X2 que passa pel punt d'ancoratge de l'amortidor al xassís:</i>	Y_m
<i>Distància entre el punt final del segment X1, fins al eix del basculant:</i>	X_2
<i>Distància entre enllaç basculant triangle amb l'eix de la roda:</i>	S_2
<i>Distància entre enllaç basculant triangle amb l'enllaç bieleta triangle:</i>	T_1
<i>Distància entre enllaç bieleta triangle amb l'enllaç amortidor triangle:</i>	T_2
<i>Distància entre enllaç xassís basculant amb l'eix de la roda:</i>	S_1
<i>Distància entre enllaç xassís basculant i enllaç xassís amortidor projectada en direcció horitzontal:</i>	a_x
<i>Distància entre enllaç xassís basculant i enllaç xassís amortidor projectada en direcció vertical:</i>	a_y

<i>Distància entre enllaç xassís basculant i enllaç xassís bieleta projectada en direcció horitzontal:</i>	b_x
<i>Distància entre enllaç xassís basculant i enllaç xassís bieleta projectada en direcció vertical:</i>	b_y
<i>Distància entre enllaç xassís-basculant i enllaç xassís-potenciòmetre projectada direcció horitzontal:</i>	p_x
<i>Distància entre enllaç xassís-basculant i enllaç xassís-potenciòmetre projectada direcció vertical:</i>	p_y
<i>Distància entre l'eix del basculant i el punt d'intersecció de l'eix de la pipa amb el pla superior de la tija superior:</i>	X_3
<i>Distància entre l'enllaç amortidor triangle amb l'enllaç basculant triangle:</i>	T_3
<i>Distància entre l'enllaç basculant triangle amb l'enllaç xassís basculant:</i>	S_3
<i>Força de reacció a l'aplicada pel sistema de suspensió a l'eix de la roda:</i>	F
<i>Força elàstica del conjunt molla amortidor:</i>	F_e
<i>Força pneumàtic:</i>	F_p
<i>Longitud del potenciòmetre</i>	L_{pot}
<i>Longitud entre eixos de la bieleta:</i>	b
<i>Longitud forquilles</i>	L_f
<i>Longitud natural del conjunt molla amortidor:</i>	L_{mn}
<i>Mòdul del vector perpendicular a l'eix de la pipa, amb origen el punt d'intersecció de l'eix de les forquilles amb el pla superior de la tija superior, i un punt final, qualsevol de la cartel·la del xassís de fàcil mesura, a poder ser que quedi per darrere del eix del basculant:</i>	X_1
<i>Motion Ratio:</i>	τ
<i>Offset:</i>	d
<i>Posició actual del conjunt molla amortidor:</i>	L_m
<i>Precàrrega conjunt molla amortidor:</i>	L_p

<i>Radi del pneumàtic anterior:</i>	t_f
<i>Radi del pneumàtic posterior:</i>	t_r
<i>Radi del tor de la roda anterior:</i>	ρ_f
<i>Radi del tor de la roda posterior:</i>	ρ_r
<i>Radi roda anterior:</i>	R_f
<i>Radi roda posterior:</i>	R_r
<i>Rigidesa efectiva anterior:</i>	k_f
<i>Rigidesa efectiva posterior:</i>	k_r
<i>Rigidesa molla:</i>	k
<i>Vector del programa informàtic de l'inici d'iteració:</i>	x_0
<i>Vector del programa informàtic de la longitud conjunt molla amortidor:</i>	l_{molla}
<i>Vector del programa informàtic del Motion Ratio:</i>	mr
<i>Vector del programa informàtic dels valors de solució mínims:</i>	lb

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

La idea de la realització d'aquest projecte va sorgir durant l'etapa del Motostudent (2014-2016), dins l'equip ETSEIB Racing, per tal d'entendre millor el funcionament d'una motocicleta de competició i la importància de la geometria durant el seu funcionament, una idea inculcada pel telemètric de l'equip Honda Impala de l'*European Talent Cup (ETC)*, Carles Reig. Tot i això aquest treball no es va dur mai a terme degut a la gran càrrega de feina que correspon a un projecte com el *Motostudent*.

Seguidament gràcies a Antonio Sánchez, *Project Racing*, vaig tenir la oportunitat d'anar com a telemètric al mundial de *Superbikes* amb la categoria *WorldSupersport300 (WSSP300)* amb una Honda CBR500R, això va fer que les ganes de la realització del treball afloessin de nou. Malauradament aquest projecte no va aconseguir tirar endavant per culpa d'una lesió del pilot una setmana abans de la primera carrera que el va deixar fora de joc tota la temporada. Finalment, de nou gràcies a l'ajut de *Project Racing* i dels seus participants, Antonio Sánchez i Jesús Rincón, vaig tenir l'oportunitat de participar amb una Honda NSF250R a l'*ETC*, *Federació Internacional de Motociclisme Campionat d'Espanya de Velocitat Repsol (FIM CEV Repsol)*, dins l'equip *Grupo Machado* com a telemètric. Allà vaig poder veure com treballen els telemètrics professionals gràcies a Josep Martínez, telemètric del mundial de *Moto3* de l'equip *Marinelli Cuccine Rivacold Snipers*, ensenyant-me la quantitat de dades que es pot arribar a manejar i la importància d'un *Chassis program*, com el desenvolupat en aquest projecte. Finalment gràcies a Project Racing i a Genís Espargaró, vaig tenir l'oportunitat d'ajudar a dissenyar i a desenvolupar un nou model de motocicleta de competició de petita cilindrada per a la *Copa Rieju*, la Rieju RS3RR.

Així dons degut a totes aquestes experiències i amb la necessitat de la realització d'aquest treball, vaig decidir finalment realitzar la idea que portava arrossegant des dels inicis del *Motostudent*.

2.2. Requeriments previs

Per tal de realitzar el projecte prèviament s'ha hagut d'investigar quins són els paràmetres que es modifiquen per a realitzar la posada a punt de la moto, coneixements bàsics de la geometria de la moto i a ser possible estar a prop d'una moto com les estudiades pel projecte, és a dir, de petita cilindrada.

3. Introducció

Aquest treball s'ha realitzat després de tot l'aprenentatge obtingut gràcies al *Motostudent* i totes les experiències passades des de la fi d'aquest fins a l'actualitat. Aquest és un bon complement per al món de la competició a l'hora de la posta a punt, ja que permet obtenir els paràmetres importants per l'estabilitat i l'agilitat de la moto en tot moment amb molta facilitat. Aquests paràmetres no són de mesura fàcil i precisa, això fa que en molts casos, si no es posseeix un programa d'aquests, simplement es tinguin en compte de forma qualitativa, dificultant molt i allargant innecessàriament el temps de posada a punt de la moto, ja que qualsevol modificació que es faci, modifica els valors dels paràmetres de la geometria bàsica.

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte és l'obtenció de dos programes informàtics que permetin estudiar el comportament de la geometria d'una motocicleta de competició davant dels canvis de posta a punt que aquesta pugi experimentar. A la vegada que permeti estudiar el comportament de la suspensió posterior de tipus *Pro-link*.

Els programes a realitzar han de ser executables, és a dir, que es pugin utilitzar sense la necessitat de tenir el programa amb el qual s'ha dissenyat el codi.

Les dades a introduir als programes han de ser de fàcil obtenció o mesura, ja que l'ús d'una base de dades ja funcional encareix molt el projecte.

El programa d'anàlisi de la geometria ha de ser capaç d'analitzar la geometria de la motocicleta durant la frenada i l'acceleració, un cop s'ha arribat a la fi del transitori del moviment de capcineig.

3.2. Abast del projecte

El projecte es centra en l'anàlisi de la geometria de motos de poca cilindrada i de competició, ja que facilita molt la presa de dades si es dóna el cas que són necessàries. En el cas de l'anàlisi de la suspensió posterior, només es tindrà en compte el tipus *Pro-link*.

4. Cinemàtica de la motocicleta

L'estudi de la cinemàtica de la motocicleta és realment important en relació al efecte que té sobre la dinàmica del vehicle. Aquesta té una gran influència sobre l'estabilitat direccional i la maniobrabilitat de l'aparell.

4.1. Definició cinemàtica de la motocicleta



Figura 4-1-1

La part cicle d'una moto es pot considerar, des d'un punt de vista estrictament cinemàtic, és a dir, considerant totalment rígides les suspensions, com un mecanisme compost per quatre sòlids rígids.

- El tren posterior, el qual inclou el xassís, el subxassís, el basculant i el grup motor
- El tren anterior, on hi pertanyen les forquilles, envoltades pel cercle verd de la figura 4-1-1, el sistema de direcció i la pipa de direcció, punt A de la figura 4-1-2.

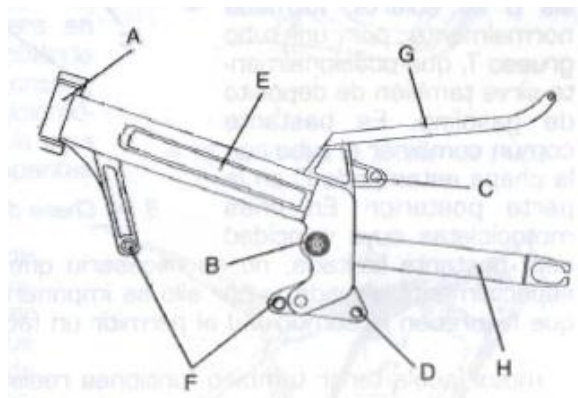


Figura 4-1-2 Esquema xassís [6]

- La roda posterior
- La roda anterior

4.2. La geometria de la motocicleta

Les consideracions a tenir en compte abans d'iniciar un estudi cinemàtic de la motocicleta són:

- L'elasticitat de les suspensions, en excepció del seu eix de desplaçament o moviment, són negligibles en aquets projecte.
- Pneumàtics rígids
- Pneumàtics esquematitzats com un sòlid toroïdal de secció circular.

Els paràmetres usals per a descriure la geometria d'una moto i estudiar-ne el seu comportament són els següents [1]:

- Batalla p
- La distància entre l'eix de la pipa de direcció i el centre de la roda, en anglès “offset” d
- La inclinació de l'eix de la pipa de direcció, l'angle d'avanç ε
- El radi de la roda posterior R_r
- El radi de la roda anterior R_f
- El radi del pneumàtic posterior t_r
- El radi del pneumàtic anterior t_f

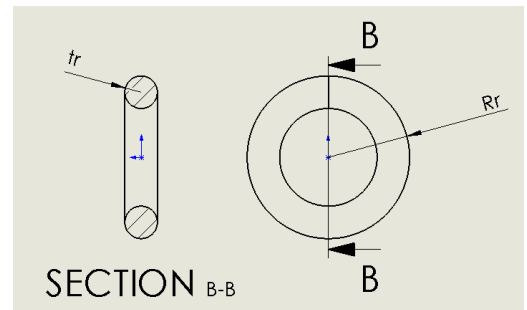


Figura 4-2-1 Roda del darrere

Per tal d'aclarir els paràmetres que defineixen la roda, observar la figura 4-2-1

Seguidament s'estableixen un seguit de paràmetres que sorgeixen en relació a les mesures anomenades anteriorment.

- Radi del tor de la roda posterior, equació 4.2.1

$$\rho_r = (R_r - t_r)$$

(Eq.4.2.1)

- Radi del tor de la roda anterior, equació 4.2.2

$$\rho_f = (R_f - t_f) \quad (\text{Eq.4.2.2})$$

- Avanç normal, equació 4.2.3

$$a_n = R_f \cdot \sin(\varepsilon) - d \quad (\text{Eq.4.2.3})$$

- Avanç lineal al terra, equació 4.2.4

$$a = \frac{a_n}{\cos(\varepsilon)} = R_f \cdot \tan(\varepsilon) - \frac{d}{\cos(\varepsilon)} \quad (\text{Eq.4.2.4})$$

Aquestes mesures es poden identificar a la figura 4-2-2.

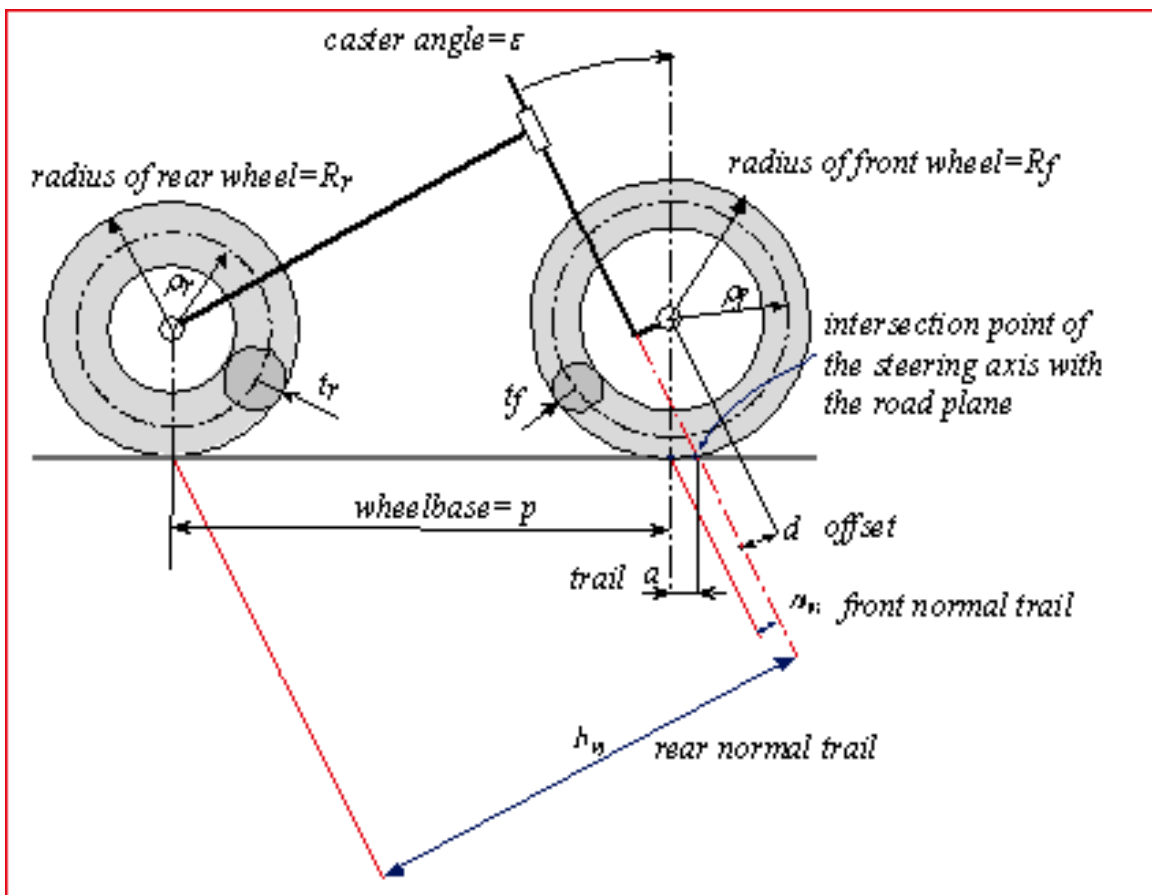


Figura 4-2-2 Geometria de la motocicleta [1]

Les mesures de la motocicleta, en les quals més usualment es fa referencia per a caracteritzar el vehicle, són:

- La batalla
- L'avanç lineal al terra
- L'angle d'inclinació de l'eix de la pipa o angle d'avanç, en la figura 4-2-2 anomenat com "*caster angle*".

Aquestes tres dimensions, sempre són mesurades amb la moto en posició vertical i el manillar totalment recte, és a dir, l'angle de la direcció nul, tal i com apareix en la figura 4-2-2.

L'avanç lineal al terra és la distància entre el punt de contacte del pneumàtic amb el terra i el punt d'intersecció de l'eix de la pipa amb la carretera. Aquesta magnitud defineix la percepció de manejabilitat que tindrà el pilot del vehicle.

Una altre consideració a tenir en compte és la batalla de la motocicleta. El valor d'aquesta distància varia en funció del tipus de moto que és conduïda. Per exemple, "scooters" de poca cilindrada pensades per a ser àgils per a ciutat tenen una batalla d'aproximadament 1200mm, mentre que motos d'alta cilindrada presenten distàncies de 1600mm.

L'increment de la batalla, si es mantenen constants els altres paràmetres anteriorment esmentats, l'avanç lineal al terra i l'angle d'avanç, comporta:

- Un augment desfavorable de la deformació lateral i torsional del xassís i del basculant. La rigidesa dels dos anteriors determina la manejabilitat de la moto en corbes d'alta velocitat on la moto passa molt inclinada, [1].
- Un augment desfavorable del radi mínim de curvatura, augmentant la dificultat de traçar corbes de poc radi, [1].
- Un augment desfavorable del moment a realitzar sobre el manillar per a poder inscriure el vehicle a la corba, [1].
- Una disminució de la transferència de càrrega a la roda del darrere, durant les acceleracions, i a la roda del davant en les frenades. Com a conseqüència d'això resulta més difícil arribar a la frenada o acceleració màximes limitades per l'aixecament de la roda anterior o posterior, en els respectius casos, [1].
- Una disminució del moviment de capcineig de les masses suspeses generat per les possibles irregularitats del terreny, [1].
- Un augment favorable de l'estabilitat direccional del vehicle, [1].

Els altres dos paràmetres, l'angle d'avanç i l'avanç lineal al terra són importants a l'hora de definir les característiques geomètriques de la manejabilitat de la moto i l'estabilitat direccional d'aquesta.

L'angle d'avanç varia en funció del tipus de motocicleta que es vulgui aconseguir: Una moto preparada per "Speedway" presenta un angle d'avanç de 19° , mentre que una moto de competició tipus Moto3 és d'entre 21° i 23° . En vehicles turístics s'ha arribat als extrems dels 40° en el cas de les "choppers". Aquesta diferència la podem veure en la figura 4-2-2.



Figura 4-2-2 Comparativa dels angles d'atac entre una Honda NSF250RW (Moto3) i una rèplica de la "Captain America" de la pel·lícula "Easy Rider"

Si aquest angle és molt petit apareixen problemes durant la frenada, ja que les forquilles no s'enfonsarien degut a la força de la frenada, sinó que aquesta el que faria seria deformar-les d'una forma molt més brusca que si l'angle fos més gros. Aquesta deformació pot arribar a causar vibracions innecessàries del tren davanter de la motocicleta, conegudes com "wobble", oscil·lació del tren davanter al voltant del eix de direcció, i el "chatter", oscil·lació intermitent de les forquilles en el pla que conté el vector força de frenada i és perpendicular al terra, [1], [5].

El valor de l'angle d'avanç està molt lligat al valor de l'avanç lineal al terra, un augment de l'angle d'avanç, comporta, sempre que no es modifiqui l' "offset" de les tiges, figura 4-2-3, o les forquilles, un augment de l'avanç lineal al terra.

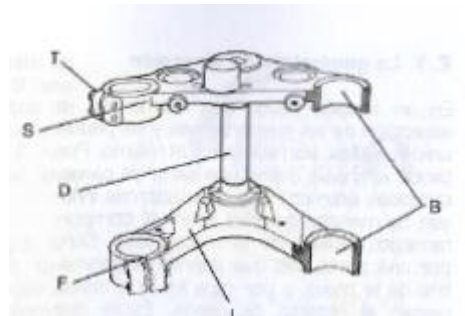


Figura 4-2-3 Tiges d'una forquilla telescòpica [6]

4.3. L'avanç lineal al terra de la motocicleta

El valor de l'avanç lineal al terra depèn del tipus de vehicle i la batalla d'aquest. Una moto de carreres presenta un avanç lineal al terra d'entre 75 a 95 mm mentre que una moto totalment turística arriba fins a valors de 120mm, això sense oblidar les "choppers" que poden arribar a valors d'avanç lineal al terra de 150mm i superiors.

La moto ha de ser capaç de produir una variació de la força lateral necessària per a tal de canviar de direcció o de poder garantir l'equilibri d'aquesta.

Des d'un punt de vista geomètric la direcció es pot definir amb 3 paràmetres, figura 4-3-1:

- L'angle d'avanç
- L' "offset"
- El radi de la roda del davant

Aquests paràmetres permeten calcular el valor de l'avanç normal, equació 4.2.3, distància positiva quan el punt de contacte de la roda anterior amb la superfície de la carretera queda per darrere del punt d'intersecció de l'eix de la pipa de direcció amb el pla de la carretera.

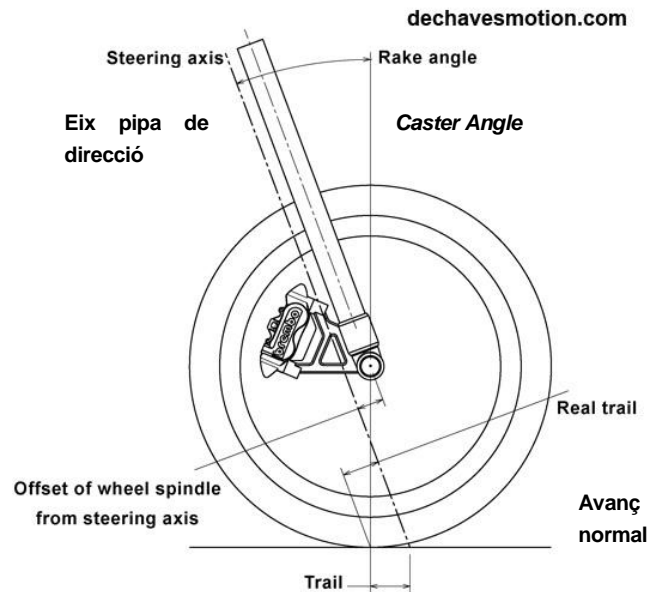


Figura 4-3-1 Diagrama extret de dechavesmotion.com que explica l'avanç de la motocicleta

$$a_n = R_f \cdot \sin(\varepsilon) - d \quad (\text{Eq.4.2.3})$$

A partir de l'avanç normal podem extreure l'avanç lineal al terra utilitzant l'equació 4.2.4:

$$a = \frac{a_n}{\cos(\varepsilon)} = R_f \cdot \tan(\varepsilon) - \frac{d}{\cos(\varepsilon)} \quad (\text{Eq.4.2.4})$$

Aquest valor però, no és estàtic, ja que hi ha molts factors que influeixen sobre la mesura d'aquest durant la conducció de la motocicleta, com ara l'angle de balanceig d'aquesta, l'angle d'avanç, el perfil del radi i la posició en aquell moment de les forquilles.

El valor de l'avanç normal (i de l'avanç lineal al terra) del vehicle és altament important per l'estabilitat d'aquest, sobretot en línia recta. Suposem una motocicleta circulant en línia recta a una velocitat V , seguidament, per una causa x , ja sigui una irregularitat de la carretera, una ventada... El punt de contacte de la roda anterior amb el terra es desplaça amb una velocitat perpendicular al pla vertical de la motocicleta, $V_{\text{perturbació}}$, girant el manillar d'aquesta. Aleshores, el pneumàtic degut a les deformacions que pateix, genera una força d'igual direcció que la $V_{\text{perturbació}}$ però de sentit contrari. Com que l'avanç normal de la moto és positiu, aquest genera un moment que tendeix a retornar el punt de contacte de la roda amb la carretera al seu punt d'origen, és a dir, a la posició d'equilibri. El valor del moment anomenat és directament proporcional al valor de la força generada pel pneumàtic i del valor

de l'avanç normal de la moto, tal i com es mostra en la figura de l'esquerra de la figura 4-3-2.

Si l'avanç normal o l'avanç lineal al terra tinguessin un valor negatiu, és a dir, el punt de contacte de la roda amb el terra queda per davant del punt d'intersecció de l'eix de la pipa de direcció amb el pla de la carretera, el moment generat per la força lateral del pneumàtic tendiria a augmentar més l'angle de direcció de la moto, la qual cosa, comprometria greument l'equilibri del vehicle, figura 4-3-2.

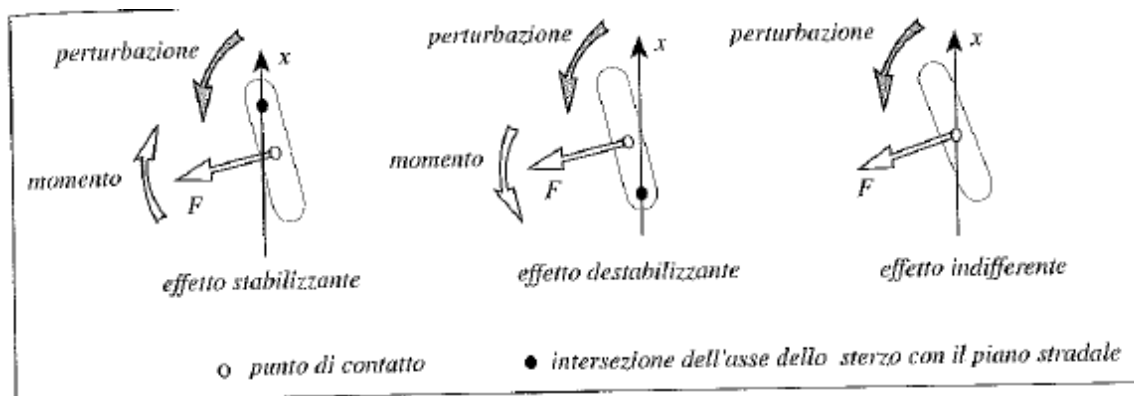


Figura 4-3-2 Moment generat per l'avanç i la força del pneumàtic [1]

Aquest moment ve explicat per la següent equació, on M és el vector moment generat, F_p el vector força generada pel pneumàtic i a_n el vector avanç normal, equació 4.3.1:

$$\vec{M} = \vec{F}_p x \vec{a}_n \quad (\text{Eq.4.3.1})$$

Com a corol·lari d'aquesta explicació es té:

- Valors petits d'avanç lineal al terra, generaran un moment petit, però la maniobra de canvi de direcció serà més "lleugera", ja que el pilot haurà de vèncer un moment menor, però la moto serà més sensible a les irregularitats del terreny.
- Valors elevats de l'avanç lineal al terra, augmentaran l'estabilitat en línia recte de la moto, però empitjoraran la maniobra de canvi de direcció, fent que el pilot noti la moto "pesada".

Un altre apunt a considerar és com el pneumàtic generà la força lateral. La roda té el mateix angle que la direcció que segueix el vehicle, com a conseqüència d'això, el desplaçament del punt de contacte de la roda amb el terra és pot quantificar amb un

angle anomenat angle de deriva, en anglès “*slip angle*”. Aquesta força és doncs proporcional al valor de l'angle de deriva i d'un coeficient anomenat rigidesa a la deriva del pneumàtic, que depèn de les propietats del pneumàtic, i la adhesió d'aquest en el terreny, provocant que en un terreny en males condicions, ja sigui per brutícia o estigui moll, el pilot percebi la moto com més lleugera, ja que el moment a vèncer per a entrar en la corba serà menor, [1]. Com a tal, per a compensar aquest efecte, el que s'hauria de fer és augmentar l'avanç de la moto, i així garantir l'estabilitat d'aquesta.

4.3.1. Avanç normal de la roda posterior

L'avanç normal de la roda posterior és un paràmetre menys important que el de la roda anterior, ja que el seu efecte és menor, tot i això és bo tenir-lo en compte. Aquest avanç és la distància entre el punt d'intersecció de l'eix de la pipa amb el pla de la carretera i el punt de contacte de la roda posterior amb la carretera, aquest pren per valor el donat per l'equació 4.3.1.1.

$$b_n = (p + a) \cdot \cos(\varepsilon) \quad (\text{Eq.4.3.1.1})$$

Tot i tenir valors d'avanç normal posterior molt més elevats, i per tant, una distància major

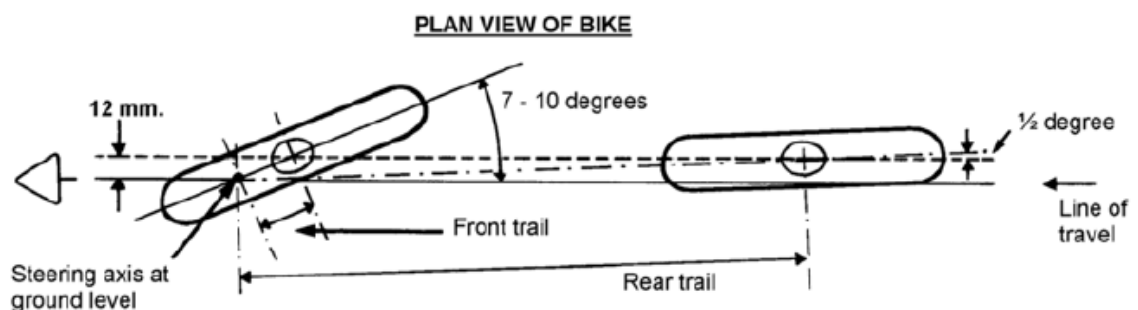


Figura 4-3-1-1 Comparativa entre l'angle de deriva de la roda anterior i el de la roda posterior [2]

entre la força i l'eix de direcció, el moment estabilitzador és més petit, ja que per un mateix desplaçament del punt de contacte, tant per la roda anterior com la posterior, l'“*slip angle*” és molt menor, ja que el desplaçament del punt de contacte amb el terra és menor, i com a tal, la força generada pel pneumàtic també, [2], veure figura 4-3-1-1.

Així doncs, aquesta definició de l'avanç normal posterior mostra la relació entre l'avanç normal i la batalla, i per tant s'han de considerar junts. No és correcte doncs definir un avanç

lineal al terra gran o petit si no està referit al valor de la batalla del vehicle. Com a conseqüència d'això s'estableix un paràmetre, equació 4.3.1.2 que permet relacionar l'avanç anterior normal amb l'avanç normal posterior:

$$R_n = \frac{a_n}{b_n} \quad (\text{Eq.4.3.1.2})$$

5. Sistemes de suspensió d'una motocicleta

5.1. Nota de l'autor

En aquest apartat de la memòria es procedirà a explicar dinàmica bàsica dels sistemes de suspensió, per donar una petita base de coneixement a tots els possibles lectors no experts en el tema, d'aquesta forma també és remarca la importància del programa realitzat que permet calcular la progressió de les suspensions.

5.2. Introducció

Una motocicleta sense suspensions que circulés per un terreny irregular presentaria una dificultat de conducció molt elevada pel pilot. Aquesta pot provenir per una possible falta d'adherència dels pneumàtics amb el terra o una disminució molt important del confort del pilot. Una petita irregularitat del terreny pot ser mitigada pel pneumàtic, però per absorbir les irregularitats més grans es necessari d'un sistema de suspensions.

Una motocicleta dotada d'un sistema de suspensions tant anterior com posterior, pot ser considerat, des del punt de vista dinàmic, com un conjunt de sòlids rígids units per elements elàstics que treballen en un mateix pla vertical. Aquests sòlids es classifiquen en dos tipus: la massa no suspesa, i la massa suspesa. La massa no suspesa són tots aquells elements en els quals la suspensió no aïlla del terra, com ara:

- Pneumàtics i llantes
- Discs de fre i pastilles
- Basculant
- Sistema de bieletes, en cas que en tingui
- Propis amortidors

No obstant això, tant el basculant, com el sistema de bieletes i els conjunts molla amortidor no pertanyen totalment a les masses no suspeses, si no que només hi pertany una part proporcional a la posició del centre de inèrcies d'aquests.

Les masses suspeses en canvi, són totes aquelles que estan aïllades del terra mitjançant els sistemes de suspensió.

- Xassís
- Motor

- Pilot

Els objectius del sistema de suspensió són els següents:

- Permetre que les rodes segueixin el perfil de la carretera sense transmetre excessives acceleracions a les masses suspeses, i així augmentar la comoditat del pilot. És a dir, aïllar les masses suspeses de les vibracions generades pel contacte de les masses no suspeses amb el terra.
- Assegurar el contacte de les rodes amb la carretera en tot moment amb l'objectiu de mantenir l'adherència d'aquestes, i així poder transmetre les forces d'acceleració, frenada i laterals al terra en tot moment.
- Garantir la geometria desitjada de la moto en qualsevol moment del seu funcionament, accelerant, frenant, entrant en corba i sortint de la corba.

En funció del tipus de motocicleta que es porti, es donarà més o menys prioritat als objectius anomenats, canviant així les característiques del sistema de suspensió. Per exemple, l'objectiu més important d'una moto de carrer és garantir la comoditat del pilot, ja que en el moment de dissenyar el vehicle, no es coneixen les condicions de la carretera per la qual circularà l'artefacte. A més a més, el pilot no tindrà les habilitats d'entrar en una corba apurant una frenada i derrapant amb la roda del darrere, tal i com es veu en les carreres de gran cilindrada. En una moto de carreres en canvi, es dona molta més prioritat al segon i tercer punt esmentats anteriorment, arribant a depreciar la comoditat del pilot mentre aquest sigui ràpid. D'aquesta forma s'aconsegueix garantir una geometria idònia per a cada corba del circuit, controlar la transferència de càrrega per evitar derrapatges de les rodes o l'aixecament d'aquestes, i així aprofitar al màxim les característiques de la moto.

5.3. Suspensió anterior

El tipus de suspensió davantera més típica són les forquilles telescòpiques, aquestes estan construïdes per dos tubs de diferents diàmetres, on un dels dos pot lliscar per dins de l'altre. Dins d'aquest tipus se'n poden separar dos grups: les forquilles clàssiques, per a motos de carrer utilitàries, i les forquilles invertides, figura 5-3-1, les quals tenen una major rigidesa a flexió i torsió. Aquestes segones s'utilitzen sobretot en la competició.



La forquilla telescòpica presenta una inèrcia limitada al voltant de l'eix de la pipa de direcció, en

Figura 5-3-1 Forquilla WP invertida

comparació amb altres tipus de suspensió que explicarem més endavant.

Aquestes durant el procés de frenada tendeixen a enfonsar-se molt, disminuint així l'angle d'avanç i l'avanç lineal al terra de la motocicleta. Aquest era un problema greu antigament ja que el pneumàtic no era capaç d'aguantar els esforços que li suposava entrar així en una corba, degut això van començar a aparèixer tots els sistemes "antidive", aquests intentaven que la suspensió davantera no realitzés gran part o tota la carrera durant les frenades fortes.

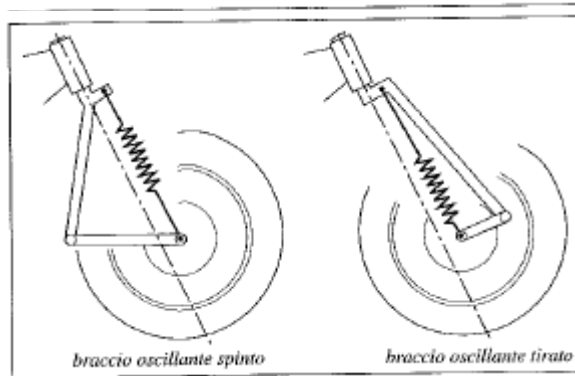


Figura 5-3-2 Sistema de braç oscil·lant [1]

Per tal de poder garantir una estabilitat del tren davanter durant les frenades fortes es van desenvolupar sistemes de suspensió alternatius, com ara el braç oscil·lant com el de la Vespa, figura 5-3-2, o sistemes de quadrilàters articulats, figura 5-3-3, per a poder-ho solucionar.

Aquests sistemes a més tenen la gran avantatge de que ofereixen una certa progressivitat en relació a la força aplicada per la molla. És a dir, es pot

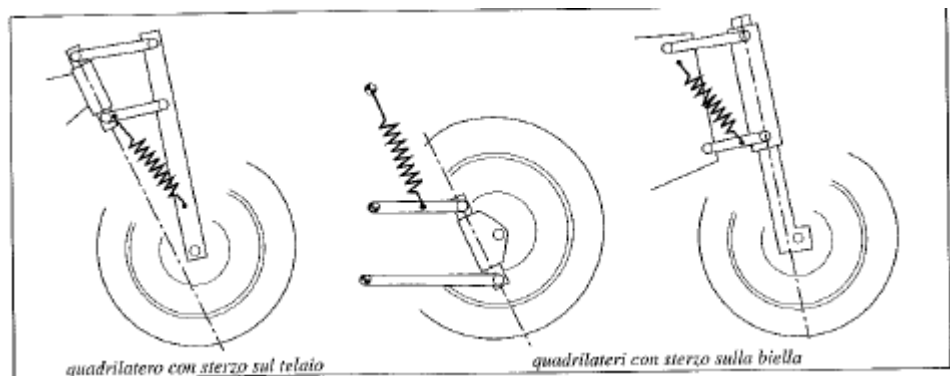


Figura 5-3-3 Sistema de quadrilàter articulat

aconseguir un inici de carrera molt menys rígid i un final de carrera totalment diferent a l'inici, sense passar per un comportament lineal.

Tot i aquests intents, s'ha de remarcar que actualment la gran majoria de motos de competició utilitzen forquilles telescòpiques, ja que amb la millora dels pneumàtics, l'enfonsament en les frenades passa a ser un avantatge, ja que redueix l'avanç lineal al terra i la batalla de la moto just en el moment en que es necessita, fent que aquesta es torni més àgil.

5.4. Sistemes de suspensió posteriors

La forma constructiva clàssica de la suspensió posterior d'una motocicleta és mitjançant un braç oscil·lant, figura 5-4-1, unit al xassís mitjançant un enllaç cilíndric que li permet la rotació al voltant de l'eix del cilindre. Entre xassís i basculant, a més a més, hi ha dos conjunts molla amortidor, un per a cada braç del basculant, inclinats un determinat angle respecte al basculant. Aquest sistema presenta les següents característiques:

- Simplicitat constructiva
- Facilitat de dissipar la calor generada per l'amortidor
- Una gran carrera dels amortidors, que és quasi igual a la carrera vertical de la roda, la qual cosa permet als amortidors treballar amb altes velocitats de compressió i extensió, [1]
- Poca força de reacció transmesa al xassís
- Carrera de la roda limitada
- Característiques de la suspensió poc progressives
- La possibilitat de que els dos conjunts molla amortidor apliquin forces diferents degut a les toleràncies d'ambdós components, com a conseqüència d'això obtenim un mal funcionament de la suspensió, i una torsió no desitjada del basculant.



Figura 5-4-1 Ossa Mike Andrews amb sistema de braç oscil·lant



Figura 5-4-2 Ducati Pantah 600 amb sistema "cantilever"

Per tal de pal·liar les desavantatges del sistema anterior, va sorgir el sistema "Cantilever", figura 5-4-2. Aquest sistema uneix el xassís i el basculant mitjançant un amortidor col·locat pràcticament horitzontal. Aquesta geometria presenta les següents característiques:

- Facilitat de regulació, ja que només presenta un sol amortidor
- Rigidesa lateral i a torsió del basculant més elevada que en el sistema del braç oscil·lant, ja que el

basculant presenta un major moment d'inèrcia resistent.

- Major carrera de la roda
- Característiques de la suspensió poc progressives
- Dificultat d'eliminar la calor, degut a la seva posició tant propera al motor.

L'última geometria a explicar és la que probablement s'utilitza en els models actuals. Aquesta geometria correspon a un quadrilàter articulat i que en funció de com s'uneixen les peces rep diferents noms, figura 5-4-3.

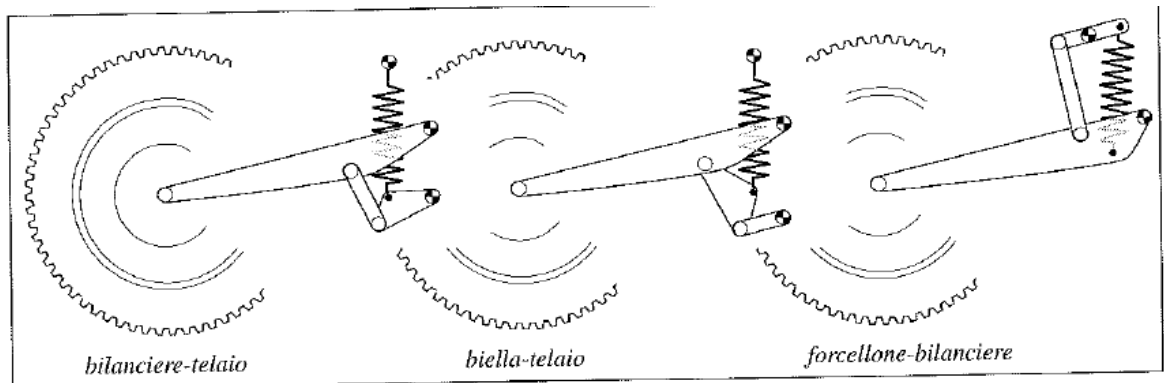


Figura 5-4-3 [1], sistemes de suspensió per quadrilàter, d'esquerra a dreta Sistema "Unitrak" de Kawasaki®, Sistema "Pro-link" d'Honda® i Sistema "Full floater" de Suzuki®

La gran avantatge d'aquests sistemes és la possibilitat de regular la corba de progressivitat de la suspensió canviant la geometria dels components. D'aquesta forma, amb un mateix conjunt molla amortidor podem aconseguir una geometria per una moto de carrer, molt progressiva, amb l'objectiu de mantenir un comportament constant sigui quin sigui el pes del pilot i del passatger; o una suspensió menys progressiva on el seu objectiu no sigui la comoditat del pilot, si no l'adherència del pneumàtic.

5.5. Rigidesa efectiva de la suspensió

Les característiques dinàmiques de la suspensió, tant anterior com posterior, es defineixen a partir dels següents paràmetres, la rigidesa, l'amortiment i la precàrrega. Per a determinar els valors d'aquests es necessita d'una gran quantitat d'informació: la massa del pilot i la motocicleta, la posició del centre d'inèrcia del vehicle, les característiques d'amortiment i la rigidesa vertical del pneumàtic, la geometria de la moto i les condicions de funcionament d'aquesta, ja sigui el terreny per on circularà, les capacitats de frenada i acceleració d'aquesta, la tècnica del pilot...

Per tant, per tal d'estudiar-ne el comportament d'una forma simple, es defineix la suspensió equivalent com, figura 5-5-1:

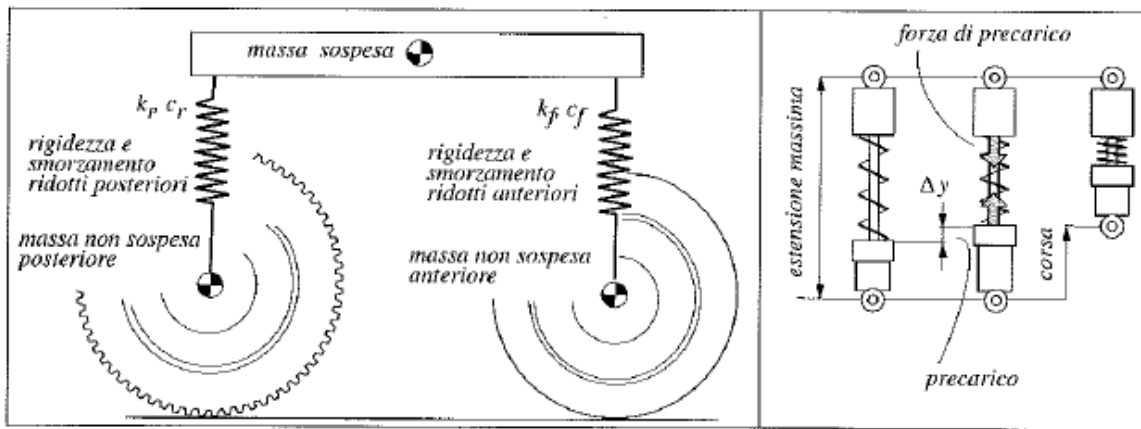


Figura 5-5-1 [1] Sistema de suspensió anterior i posterior equivalent, a la dreta esquema del funcionament de la precàrrega

- Rigidesa efectiva
- Amortiment efectiu
- La dependència de la rigidesa efectiva del desplaçament vertical de la roda, progressivitat
- La carrera màxima de la roda
- La precàrrega

5.5.1. Suspensió anterior

En aquest apartat es considerarà només les forquilles telescòpiques, normals o invertides, el funcionament és el mateix, ja que aquestes són les més utilitzades en els models actuals.

Com que la carrera vertical de la roda, la carrera de la forquilla anterior i la de la suspensió equivalent són iguals, si es sotmeten les tres a una mateixa càrrega obtenim que les rigideses han de complir la següent relació, equació 5.5.1.1:

$$k_f = \frac{k}{\cos(\varepsilon)^2} \quad (\text{Eq.5.5.1.1})$$

On k_f és la rigidesa efectiva anterior, k la rigidesa nominal de la molla i ε l'angle d'avanç de la forquilla.

Utilitzant les mateixes consideracions anterior i imposant una igual velocitat vertical unitària a l'eix de la roda, obtenim que els coeficients d'amortiment han de complir la següent relació,

equació 5.5.1.2:

$$c_f = \frac{c}{\cos(\varepsilon)^2} \quad (\text{Eq.5.5.1.2})$$

5.5.2. Suspensió posterior

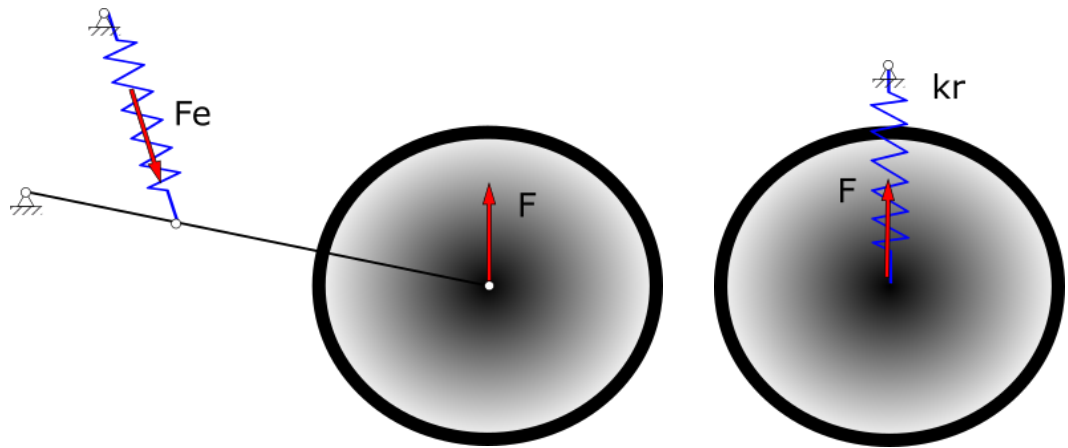


Figura 5-5-2 Suspensió equivalent posterior

Per a tal de simplificar l'explicació s'utilitzarà el sistema de suspensió clàssic, el de braç oscil·lant. Tot i això la fórmula final és vàlida per a qualsevol geometria.

La força elàstica de la molla és, equació 5.5.2.1:

$$F_e = k(L_m - L_{mn}) \quad (\text{Eq.5.5.2.1})$$

On k és la rigidesa de la molla, L_m la posició actual del conjunt molla amortidor i L_{mn} la longitud natural del conjunt molla amortidor. Com a conseqüència de l'aplicació de la força elàstica, apareix una força de reacció F al eix de la roda, la força elàstica efectiva. Aquesta es pot calcular utilitzant el "Motion Ratio" o el rati de velocitats, equació 5.5.2.2.

$$\tau = \frac{\dot{L}_m}{\dot{y}_c} \quad (\text{Eq.5.5.2.2})$$

On τ és el "Motion Ratio", el numerador la velocitat de compressió o extensió de l'amortidor, i el denominador el desplaçament vertical de la roda. Aquests dos valors però al anar relacionats permeten que es pugui substituir per el rati de posicions i no de velocitats.

Aleshores, es compleix equació 5.5.2.3 i equació 5.5.2.4:

$$F = F_e \tau \quad (\text{Eq.5.5.2.3})$$

$$k_r = \frac{\partial}{\partial y_c} F = k \cdot \tau^2 \quad (\text{Eq.5.5.2.4})$$

On k_r és la rigidesa efectiva posterior i y_c el desplaçament vertical de la roda. Anàlogament podem seguir el mateix procés i obtenir el coeficient d'amortiment eficaç, equació 5.5.2.5:

$$c_f = c \cdot \tau^2 \quad (\text{Eq.5.5.2.5})$$

5.5.3. Corba de progressivitat

Si es grafica la força efectiva de la suspensió en funció del desplaçament vertical de la roda, poden passar tres casos:

- Un augment lineal de la força
- Un augment creixent de la força
- Un augment decreixent de la força

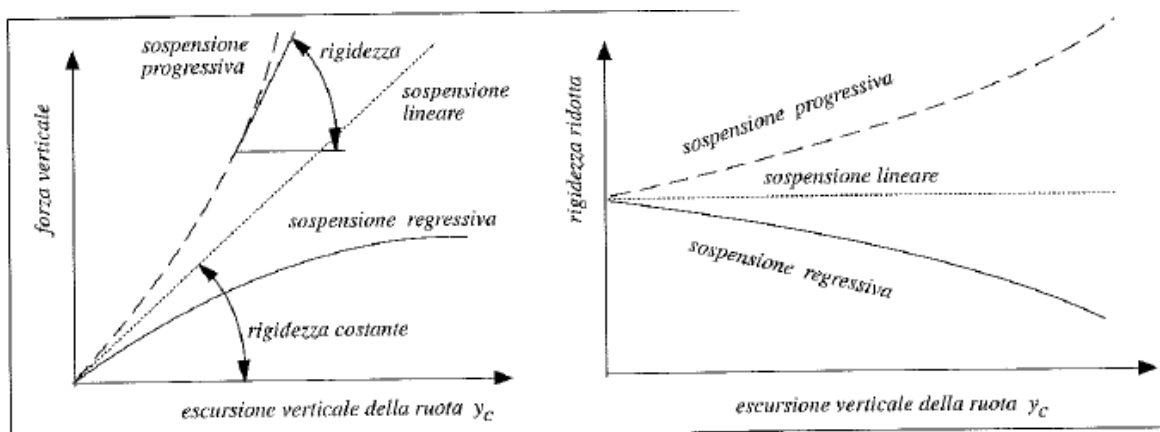


Figura 5-5-3-1 Relació de la força amb la constant efectiva

El tipus d'augment de la força depèn de com la rigidesa efectiva de la suspensió canvia al llarg del recorregut vertical de la roda. Així doncs, si aquesta presenta un valor constant, l'augment de la força serà lineal; si aquesta creix al llarg del recorregut de la roda,

comportament progressiu, l'augment de la força serà creixent o progressiu; i si la rigidesa decreix al llarg del recorregut de la roda, regressiva, l'augment de la força serà decreixent o regressiu, figura 5-5-3-1.

Així doncs una suspensió progressiva és capaç de mantenir aproximadament constant la freqüència de vibració dels modes de vibració en el pla, al augmentar la massa del vehicle, ja sigui per l'equipatge, el passatger... Aquesta però pot presentar problemes d'adherència en les frenades fortes o acceleracions, si la progressivitat fos molt exagerada, ja que el moviment de capcineig de la massa suspesa quedaria aturat degut a la gran rigidesa efectiva que presentaria aquest sistema a finals de la carrera de la roda, passant així a un sòlid rígid, a grans trets, afavoriria la transferència de càrrega i podria arribar a perdre el contacte d'alguna de les dues rodes.

Per tant una motocicleta dissenyada per la carretera tindrà un comportament molt progressiu, mentre que una moto de competició per asfalt tendirà a ser el més lineal possible.

5.5.4. La precàrrega

Per tal de regular el comportament de la moto, essencialment variar la càrrega a la que cada una de les rodes està sotmesa, es pot utilitzar la precàrrega del conjunt molla amortidor. Aquesta consisteix en una precompressió de la molla, com a conseqüència d'això, si no apliquem sobre aquesta, una força major a la generada per la precàrrega, aquesta no es deforma. La força aplicada per la molla segueix la següent equació, equació 5.5.4.1:

$$F_e = k \cdot (L_m - L_p) + k \cdot (L_p - L_{mn}) \quad (\text{Eq.5.5.4.1})$$

On k és la constant de la molla, L_p és la deformació generada per la precompressió de la molla, L_m la posició actual del conjunt molla amortidor i L_{mn} la longitud natural del conjunt molla amortidor.

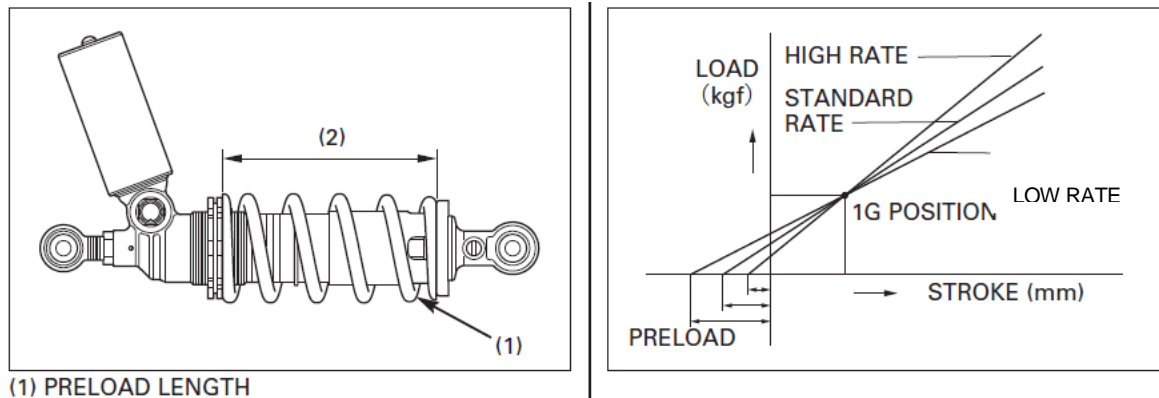


Figura 5-5-4-1 [3] Esquema del funcionament de la precàrrega

A la figura 5-5-4-1 es pot observar com, per a molles de k de diferent valor, és pot obtenir el mateix valor de força en una mateixa posició de l'amortidor, variant simplement el valor de la precàrrega de la molla.

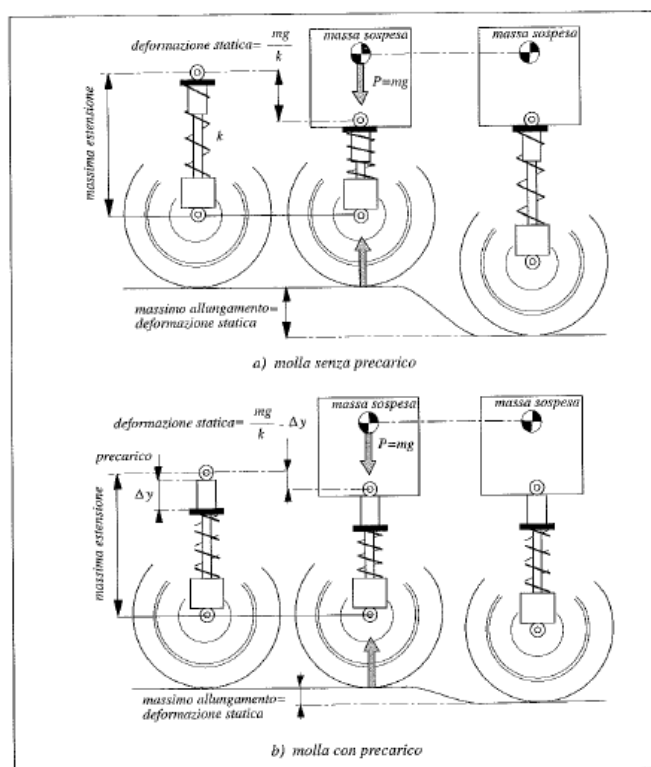


Figura 5-5-4-2 Carrera en extensió deguda a la precàrrega

A més a més amb l'ajust de la precàrrega es regula la carrera màxima en extensió de la roda. Quan s'instal·la l'amortidor a la moto es fa amb aquest totalment estirat, i és el pes del vehicle i del pilot el que el comprimeixen, com a conseqüència d'això, la carrera màxima de la roda en extensió, és igual a la deformació explicada anteriorment de la suspensió efectiva. El fet d'aplicar precàrrega a la molla, limita aquesta deformació, limitant doncs també, la carrera màxima en extensió de la roda, tal i com es pot veure en la figura 5-5-4-2.

6. Estudi de mercat

Actualment existeix una certa quantitat de programes informàtics capaços de calcular els paràmetres necessaris com ara l'avanç, la distància entre eixos i l'angle d'atac d'una motocicleta de competició. Tot i això, aquests són poc utilitzats degut als alts preus que presenten.

- MotoSpec chasis program®, figura 6-1



- Funcions

- Càlcul de progressivitat suspensió posterior
 - Càlcul del enfonsament del sistema de suspensió posterior durant el procés d'acceleració
 - Càlcul de forces generades per les forquilles i l'amortidor
 - Exportar dades al sistema d'adquisició de dades per tal de visualitzar els canvis en el xassís al llarg de l'ús de la motocicleta
 - Càlcul de la geometria del vehicle
 - Dades de diversos models de motos

Figura 6-1

- Preu

- Llicència 1095\$/any

- SuspAct motorcycle geometry®

- Funcions

- Calcular la geometria i comparar-la
 - Analitzar les forces generades a les forquilles i a l'amortidor en estàtic
 - Calcular progressivitat suspensió posterior
 - Dades de diversos models de motos

- Preu

- Llicència 99,99\$
 - 500\$/model de moto
 - 100\$/models de bieletes per una moto

- Tony Foale's motorcycle setup software

- Funcions

- Calcula la geometria
 - Calcula la progressivitat de les suspensions, figura 6-2
 - Càlcul del enfonsament del sistema de suspensió posterior durant el procés d'acceleració

- Preu
 - 99€

Es veu clarament doncs que les dades dels models actuals són el que pugen més el preu. Preus que per a un nivell semi-professional no es poden assolir. En canvi, el preu de l'últim programa presentat és acceptable, però presenta l'inconvenient que té el codi tancat. Per tant, si es volgués en algun moment obtenir un paràmetre més a partir de les dades obtingudes anteriorment no es podria.

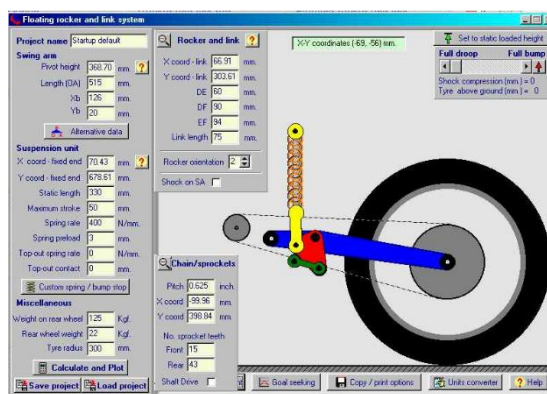


Figura 6-2

7. Llenguatge de programació

L'objectiu d'aquest apartat és explicar com i perquè es va escollir i descartar els llenguatges de programació proposats.

Prèviament a la tria es van enunciar les característiques que havia de tenir aquest per tal de realitzar la seva funció amb èxit. Aquestes havien de ser:

- Facilitat de resoldre sistemes d'equacions amb sinus i cosinus, acotant els resultats, ja que només hi ha una solució lògica
- Coneixements previs de programació en aquell llenguatge
- Creació d'un executable, aquesta característica era de vital importància, ja que aquest programa va destinat a usuaris amb un nivell informàtic baix i per tant, es va decidir que el programa no funcionés modificant el codi.
 - Facilitat de crear una interfície simple i eficient
- Informació a la xarxa
- Obtenció del software de programació, és a dir, si es lliure o de pagament

Seguidament es van proposar els llenguatges de programació següents, aquests van ser escollits, per el seu ús a l'ETSEIB:

- Excel®
- Scilab®
- Matlab®
- Python®

Finalment es va utilitzar la següent taula per a poder prendre una bona decisió, taula 7.1:

Taula 7.1

Programa	Facilitat de	Coneixements previs	Executable	Interfície gràfica	Informació relacionada	Llicència software
Excel®	No	Nivell usuari	No, (tothom té l'Excel)	Si	Poca	Pagament
Scilab®	Si	Nivell bàsic	Si, complicacions	Si	Bastanta	Lliure
Matlab®	Si	Nivell bàsic	Si	Si	Molta	Llicència estudiant
Python®	Si	Nivell intermedi	Si, llibreria externa	Si, llibreria	Molta	Lliure

Després de realitzar aquesta taula es va descartar l'Excel®, per les complicacions que presentava a l'hora de resoldre les equacions, i l'Scilab®, ja que en el procés de cerca de informació es va trobar molts usuaris amb dificultats per a realitzar un executable.

Finalment es va decantar per al Matlab® ja que aquest presentava totes les característiques necessàries en el mateix programa, sense la necessitat d'utilitzar llibreries externes. A part d'això, l'obtenció del programa va ser totalment gratuïta gràcies a la universitat.

8. Calculador de progressivitat

L'objectiu d'aquest programa informàtic és facilitar l'obtenció de la corba de progressivitat, una dada molt útil en el món de la competició, i que, si no es té cap sistema informàtic preparat, obtenir-la pot ser molt complicat i poc precís.

Un altre objectiu que vol aconseguir aquest programa, és obtenció d'un polinomi que relacioni el desplaçament del potenciòmetre del sistema d'adquisició de dades amb el desplaçament del amortidor, ja que en moltes motos de competició aquest no es pot ancorar als dos extrems de l'amortidor per falta d'espai, i s'ancora una extrem al xassís i l'altre al basculant.

8.1. Geometria utilitzada

Les equacions del moviment que s'utilitzaran en el programa del càlcul de progressivitat depenen de la geometria del sistema de suspensió posterior. Així doncs, el primer que s'ha de fer és escollir-ne un. Aquest programa està enfocat a la competició de motos de petita cilindrada, i per tant, s'escollirà el sistema més utilitzat en aquesta. Actualment a l'estat espanyol hi ha dues grans branques, el Real Federació de Motociclisme Espanyola, RFME, i el Federació Internacional de Motociclisme Campionat d'Espanya de Velocitat, FIM CEV Repsol. Al RFME, existeix la categoria SSP300, "Supersport 300", igual a la WSSP300 "WorldSupersport 300" on els models permesos per reglament són:

- Honda CBR500R
- Yamaha YZF-R3
- Kawasaki Ninja 300
- KTM RC 390



Figura 7-1-1 Honda NSF250Rw (Moto3)

De les quals, la Yamaha i la KTM porten l'amortidor fixat al basculant, la Kawasaki porta el sistema "Unitrak", i l'Honda porta "Pro-link", aquests sistemes han estat explicats en l'apartat 5.4 d'aquest projecte.

En el FIM CEV Repsol existeixen dues categories de moto petita, la "European Talent Cup",

ETC, i Moto3. A l'ETC només està permès córrer amb una Honda NSF250R, la qual porta suspensió "Pro-link". En canvi a Moto3 poden córrer una gran varietat de marques, però les més utilitzades són la Honda NSF250Rw, suspensió "Pro-link" i la KTM RC250GP que també presenta el mateix sistema.

Finalment doncs, s'ha escollit la suspensió per bieletes, tipus "Pro-link".

8.2. Model utilitzat

Per tal d'obtenir les equacions del moviment per a resoldre el sistema s'ha treballat en el pla vertical del vehicle, i seguidament s'ha fixat el basculant, les bieleta i l'amortidor al xassís, considerant aquest fixe, a partir d'enllaços de revolució, figura 7-1-2.

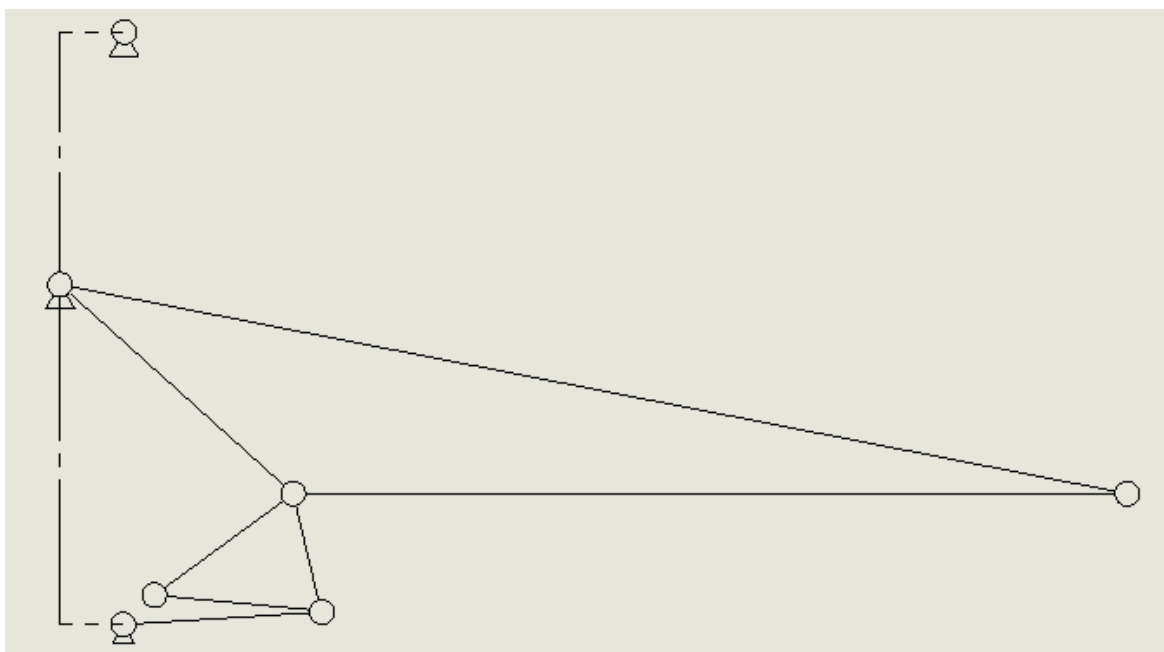


Figura 8-2-2 Model utilitzat per a obtenir les equacions

A continuació s'imposen els paràmetres que es vol que l'usuari imposi, aquests seran les mesures del basculant, el triangle i les bieletes, ja que en la competició aquestes mesures venen donades. Tot i això si es volgués utilitzar el programa per el disseny d'aquestes, s'hauria d'imposar altres paràmetres com ara l'angle desitjat del basculant.

- Basculant, figura 7-1-3
 - $S1 \rightarrow$ Distància enllaç basculant-xassís a l'eix de la

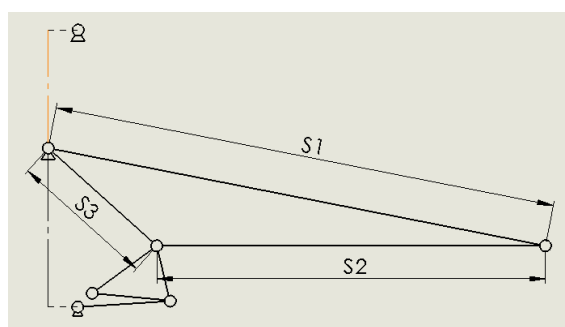


Figura 8-2-3 Dimensions basculant

roda

- $S2 \rightarrow$ Distància eix roda a enllaç basculant-triangle
- $S3 \rightarrow$ Distància enllaç basculant-triangle a enllaç basculant-xassís

- Triangle, figura 7-1-4
 - $T1 \rightarrow$ Distància enllaç basculant-triangle a enllaç bieleta-triangle
 - $T2 \rightarrow$ Distància enllaç bieleta-triangle a enllaç amortidor-triangle
 - $T3 \rightarrow$ Distància enllaç amortidor-triangle a enllaç basculant-triangle

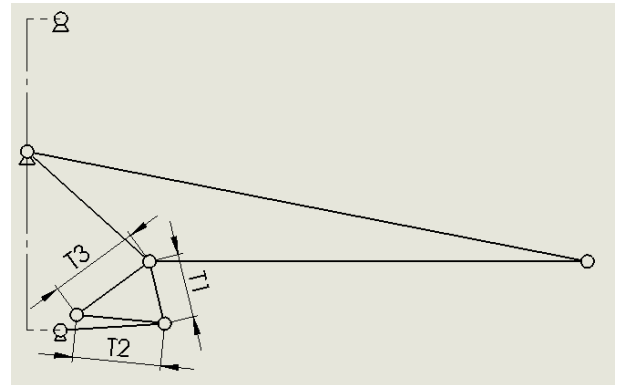


Figura 8-2-4

- Bieleta
 - $b \rightarrow$ Distància entre eixos de la bieleta
- Amortidor
 - $Lmn \rightarrow$ Longitud natural del amortidor
 - $C \rightarrow$ Carrera del amortidor

- Relacions amb el xassís, figura 7-1-5

- $ax \rightarrow$ Distància entre enllaç xassís-basculant i enllaç xassís-amortidor projectada en direcció horitzontal
- $ay \rightarrow$ Distància entre enllaç xassís-basculant i enllaç xassís-amortidor projectada direcció vertical
- $bx \rightarrow$ Distància entre enllaç xassís-basculant i enllaç xassís-bieleta projectada en direcció horitzontal
- $by \rightarrow$ Distància entre enllaç xassís-basculant i enllaç xassís-bieleta projectada direcció vertical

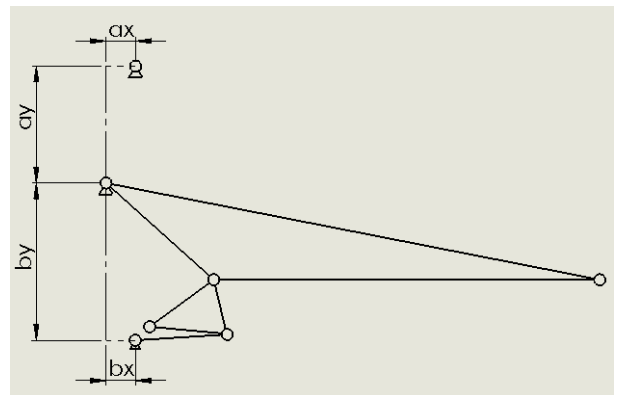


Figura 8-2-5

Els angles definits pel basculant i pel triangle s'han calculat utilitzant el teorema del cosinus. Anomenant-se en el cas del basculant $Sa1$, $Sa2$, $Sa3$, essent $Sa1$, l'angle que formen els segments $S1$ i $S3$, i continuant els altres amb sentit horari, les equacions són les equació 8.2.1, equació 8.2.2, equació 8.2.3.

$$Sa1 = \arccos\left(\frac{S1^2 + S3^2 - S2^2}{2 \cdot S1 \cdot S3}\right) \quad (\text{Eq.8.2.1})$$

$$Sa2 = \arccos\left(\frac{S1^2 + S2^2 - S3^2}{2 \cdot S1 \cdot S3}\right) \quad (\text{Eq.8.2.2})$$

$$Sa3 = \pi - Sa1 - Sa2 \quad (\text{Eq.8.2.3})$$

Els angles s'han definit en radians, ja que Matlab® treballa amb aquestes unitats. En el cas del triangle, s'ha realitzat de manera totalment anàloga, essent $Ta1$, l'angle que formen els segments $T1$ i $T3$.

Un cop amb els paràmetres definits, s'ha determinat quins angles es vol estudiar, recordem que l'objectiu del programa és trobar la corba de progressivitat de la suspensió, i per tant trobar la relació de desplaçaments entre la compressió de l'amortidor i la carrera vertical de la roda. S'ha determinat doncs els següents angles i distàncies.

- $\varphi_b \rightarrow$ Angle que forma el segment $s1$ del basculant amb l'horitzontal
- $\varphi_t \rightarrow$ Angle que forma el segment $t3$ del triangle amb la vertical
- $\theta_b \rightarrow$ Angle que forma la bieleta amb l'horitzontal
- $Lm \rightarrow$ Longitud del conjunt molla amortidor en aquell instant

Un cop determinats totes les coordenades i tots els paràmetres, s'ha procedit a l'obtenció de les equacions utilitzant la condició de tancament per les dues primeres, i determinant el mòdul del vector que uneix els dos punts on va ancorat l'amortidor per la tercera.

Eix x, equació 8.2.4:

$$0 = S3 \cdot \cos(Sa1 + \varphi_b) - T3 \cdot \sin(\varphi_t) + T2 \cdot \sin(\varphi_t + Ta3) - b \cdot \cos(\theta_b) - bx \quad (\text{Eq.8.2.4})$$

Eix y, equació 8.2.5:

$$0 = -S3 \cdot \sin(Sa1 + \varphi_b) - T3 \cdot \cos(\varphi_t) + T2 \cdot \cos(\varphi_t + Ta3) + b \cdot \sin(\theta_b) + by \quad (\text{Eq.8.2.5})$$

Distància de l'amortidor, equació 8.2.6:

$$0 = \sqrt{(ax - (S3 \cdot \cos(Sa1 + \varphi_b) - T3 \cdot \sin(\varphi_t)))^2 + (ay - (-S3 \cdot \sin(Sa1 + \varphi_b) - T3 \cdot \cos(\varphi_t)))^2} - Lm \quad (\text{Eq.8.2.6})$$

Aquest sistema presenta un sol grau de llibertat i quatre coordenades, per tant, tres d'elles són coordenades dependents. Com que el que es vol es obtenir la corba de progressivitat

de la suspensió al llarg de tot el seu recorregut s'ha decidit imposar la coordenada independent com la longitud del amortidor. Per obtenir la corba de progressivitat de la suspensió es fa recórrer tot el recorregut del amortidor, des de la longitud natural d'aquest fins la màxima compressió, resolent n vegades el sistema, on n és un valor imposat pel programador en funció de la velocitat de l'ordinador, ja que les equacions són resoltes mitjançant un procés iteratiu. D'aquesta forma, equació 8.2.7:

$$\tau_i = \frac{Lm_i}{S1 \cdot \sin(\varphi_{b_i})}; i \in [1, n] \quad (\text{Eq.8.2.7})$$

8.2.1. Model matemàtic del recorregut del potenciòmetre

Un potenciòmetre, figura 8-2-1-1 és un aparell que presenta una resistència elèctrica variable que canvia de valor en funció de la posició d'aquest, d'aquesta forma permet conèixer en tot moment la posició i la velocitat dels conjunts molla amortidor, tant anteriors com posteriors. A partir de les dades extretes se'n pot deduir si la configuració dels sistemes de suspensió és l'òptima per aquell circuit o no. Es poden veure rebots, oscil·lacions incontrolades, màxims i mínims...



Figura 8-2-1-1 Potenciòmetre

Tot hi tenir les mesures reduïdes, en alguns models de motocicleta, com ara l'Honda NSF250R, aquest no es pot ancorar als dos extrems de l'amortidor, ja que el basculant no presenta l'espai necessari com per a que aquest hi passi. Com a conseqüència d'això, s'ancora un extrem en el xassís, i l'altre en algun punt del basculant, seguidament s'agafa el recorregut màxim i el mínim i es suposa un comportament de la relació entre el desplaçament de l'amortidor amb el del potenciòmetre lineal, cosa que amb els sistemes de bieletes, provoca errors de mesura.

L'objectiu és doncs, obtenir un polinomi que relacioni la posició del conjunt molla amortidor amb la posició del potenciòmetre, d'aquesta forma es podrà realitzar un canal matemàtic en el software d'adquisició de dades utilitzant-lo.

El model matemàtic utilitzat es el mateix que l'anterior, però amb algunes modificacions:

- Basculant, s'afegeixen els següents paràmetres
 - $P1 \rightarrow$ Distància de l'enllaç xassís-basculant al enllaç basculant-potenciòmetre
 - $P2 \rightarrow$ Distància de l'enllaç basculant-potenciòmetre al eix de la roda

D'aquesta forma apareixen els següents angles, essent $Pa1$ l'angle entre els segments $P1$ i $S1$, i els altres anomenats en sentit horari, equacions 8.2.1.1, equació 8.2.1.2, equació 8.2.1.3:

$$Pa1 = \arccos\left(\frac{P1^2 + S1^2 - P2^2}{2 \cdot P1 \cdot S1}\right) \quad (\text{Eq.8.2.1.1})$$

$$Pa2 = \arccos\left(\frac{P1^2 + P2^2 - S1^2}{2 \cdot P1 \cdot P2}\right) \quad (\text{Eq.8.2.1.2})$$

$$Pa3 = \pi - Pa1 - Pa2 \quad (\text{Eq.8.2.1.3})$$

- Relacions amb el xassís, s'afegeixen els següents paràmetres:
 - $px \rightarrow$ Distància entre enllaç xassís-basculant i enllaç xassís-potenciòmetre projectada direcció horitzontal
 - $py \rightarrow$ Distància entre enllaç xassís-basculant i enllaç xassís-potenciòmetre projectada direcció vertical

D'aquesta forma per tal d'obtenir la posició del potenciòmetre s'ha d'afegir la següent equació, equació 8.2.1.4:

$$Lpot = \sqrt{(px - (P1 \cdot \cos(-\varphi_b + Pa1)))^2 + (py - (P1 \cdot \sin(-\varphi_b + Pa1)))^2} \quad (\text{Eq.8.2.1.4})$$

On $Lpot$ és la longitud del potenciòmetre.

8.3. Funcionament del programa

En aquest apartat hi ha una explicació breu del funcionament del programa, en el cas que es volgués aprofundir en el funcionament d'aquets, s'hauria d'anar a l'annex A.

El programa utilitza una funció bàsica, anomenada "*Pro-link*", que s'ha dissenyat amb l'objectiu de resoldre el sistema d'equacions. Les dades d'entrada i les de sortida s'obtenen i es donen a partir de la interfície gràfica creada amb l'editor de Matlab® "*GUIDE*", figura 8-3-1.

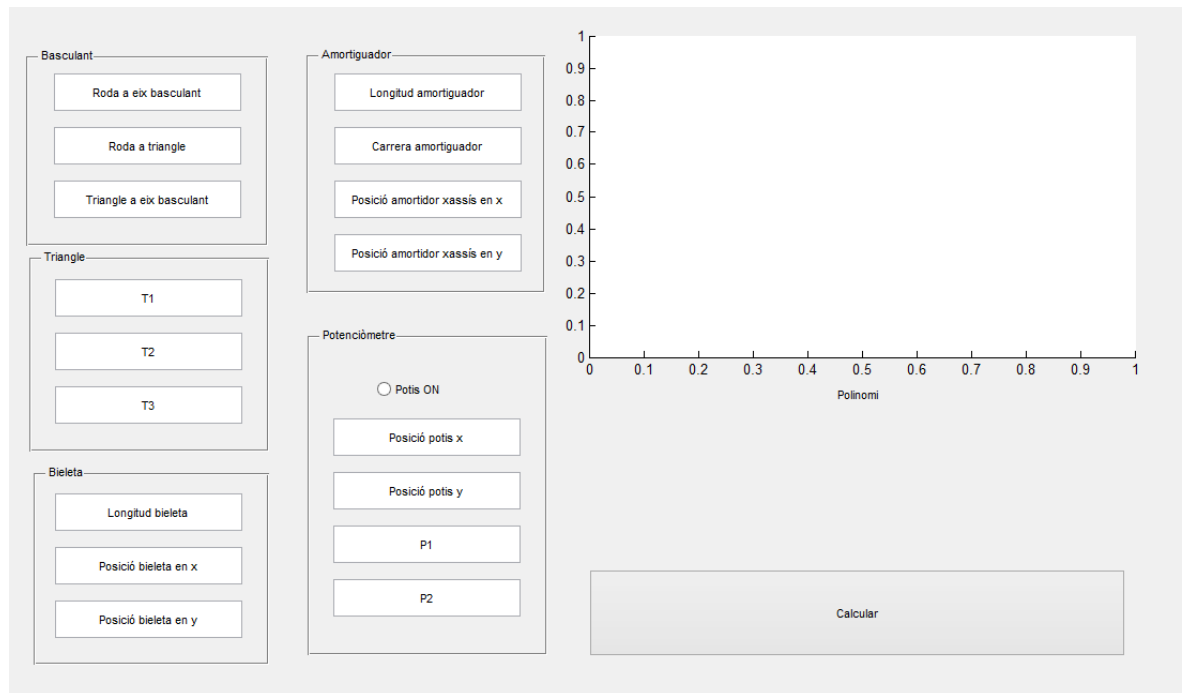


Figura 8-3-1 Interfície gràfica dissenyada amb l'editor de Matlab® "GUIDE"

Les dades d'entrada són totes aquelles que s'han d'escriure en els requadres de text de la part esquerra de la pantalla, mentre que les de sortida són el gràfic i el polinomi.

Un cop entrades les dades i es clica sobre el boto Calcular, es posa en marxa la funció "Pro-link". Aquesta el primer que fa es generar tot el llistat d'angles necessaris per a descriure la

```

global sa1
global sa2
global sa3
[sa1,sa2,sa3]=angle_triangle(s1,s2,s3);
global ta1
global ta2
global ta3
[ta1,ta2,ta3]=angle_triangle(t1,t2,t3);
global pa1
global pa2
global pa3
[pa1,pa2,pa3]=angle_triangle(p1,p2,s1);

function [a1,a2,a3]=angle_triangle(l1,l2,l3)
a1=acos((l1^2+l3^2-l2^2)/(2*l1*l3));
a2=acos((l1^2+l2^2-l3^2)/(2*l1*l2));
a3=pi-a1-a2;

```

Figura 8-3-2 Generació dels angles necessaris utilitzant la funció *angle_triangle*

geometria, figura 8-3-2, utilitzant la funció *angle_triangle*, la qual aplica el teorema del cosinus.

Seguidament s'inicia el procés de resolució de les equacions. Per tal de calcular tot el

recorregut de les suspensions es crea un vector anomenat *lmolla*, on en el qual, el seu primer valor és la longitud natural del amortidor i el seu últim valor la longitud natural del amortidor menys la carrera total d'aquest. La diferència entre components és de 0,1mm, això vol dir que si la longitud natural és de 50 i la carrera de 10, el vector *lmolla* prendrà com a valors 50 49.9 49.8... i

així fins arribar a 40. A la vegada es crea un vector solució aproximada, anomenat *x0*, el qual donarà el primer punt per iterar a la funció *fsolve*, la qual resol sistemes d'equacions no lineals, figura 8-3-3.

```
x0=[0.2155,0.1461,0.4475];
i=1;
global lm
lm=lmn;
lmolla=lmn:-0.1:(lmn-c);
```

Figura 8-3-3

Seguidament s'inicia un procés iteratiu, el qual resol les equacions imposant el valor de longitud de la molla corresponent i utilitzant la solució anterior, com a solució aproximada de l'actual. És a dir, en una iteració *j*, s'utilitza la longitud de la molla *j*, i com a solució aproximada, la solució anterior, la *j-1*. Aquest procés s'acaba en arribar a l'últim valor del vector *lmolla*, figura 8-3-4. Les equacions del moviment a resoldre, es troben en un arxiu separat anomenat *equacions_moviment*, figura 8-3-5.

```
while i<=length(lmolla)
    lm=lmolla(i);
    x0=fsolve('equacions_moviment',x0);
    x(i,:)=x0;
    lmr(i)=sqrt((xm-(s3*cos(sa1+x0(1))-t3*sin(x0(3))))^2+(ym-(-s3*sin(sa1+x0(1))-t3*cos(x0(3))))^2);
    potis(i)=sqrt((xp-(p1*cos(-x0(1)+pa1)))^2+(yp-(p1*sin(-x0(1)+pa1)))^2);
    i=i+1;
    despvertical(i)=s1*sin(x0(1));
```

Figura 8-3-4

```
function [f]=equacions_moviment(x)
global s3;
global t2;
global t3;
global sa1;
global ta3;
global b;
global xb;
global yb;
global lm;
global xm;
global ym;

%eix x
f(1)=s3*cos(sa1+x(1))-t3*sin(x(3))+t2*sin(x(3)+ta3)-b*cos(x(2))-xb;
%eix y
f(2)=-s3.*sin(sa1+x(1))-t3.*cos(x(3))+t2.*cos(x(3)+ta3)+b.*sin(x(2))+yb;
%mollla
f(3)=sqrt((xm-(s3.*cos(sa1+x(1))-t3.*sin(x(3))))^2+(ym-(-s3.*sin(sa1+x(1))-t3.*cos(x(3))))^2)-lm;
```

Figura 8-3-5

Finalment es crea el vector *mr*, el qual indica tots els valors que recórrer el “*Motion Ratio*”, i

el vector desplaçament vertical de la roda. A partir d'aquests es genera el gràfic que mostra el comportament de la suspensió. Seguidament utilitzant la funció de Matlab® *polyfit*, s'interpolen els valors del vector *lmolla* amb els valors de la longitud del potenciòmetre en cada punt. En aquest cas s'utilitza un polinomi de grau 2, ja que dona un error relatiu inferior que un de grau 1, figura 8-3-5.

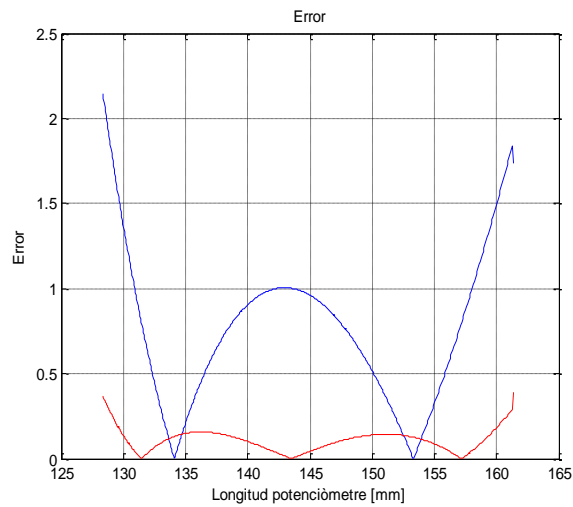


Figura 8-3-5 Gràfic de l'error relatiu del polinomi amb la posició real de l'amortidor, en blau polinomi de grau 1, en vermell polinomi

9. Calculador de geometries

L'objectiu d'aquest programa és calcular tots els paràmetres geomètrics explicats en el punt quatre: l'avanç lineal al terra, l'avanç normal, l'avanç normal posterior, la batalla i l'angle d'avanç de les forquilles; a la vegada que permet fer una idea de la posició del centre d'inèrcies de la moto. D'aquesta manera es pot aconseguir una posada a punt de la motocicleta en molt menys temps, ja que una gran quantitat de cops, es modifiquen paràmetres que influeixen en els valors trobats anteriorment, d'avanç lineal al terra, batalla... Que ja funcionaven, provocant un pas enrere.

Un altre objectiu d'aquest programa és calcular el comportament de la moto en frenada i acceleració, un cop la massa suspesa de la moto ha arribat al estacionari. De forma que només modificant la longitud dels amortidors, es pugi obtenir les dades desitjades.

9.1. Geometria utilitzada

Igual que en el programa anterior, per tal d'obtenir les equacions del moviment del mecanisme, primer s'ha de tenir clar la geometria d'aquest, és a dir el tipus de suspensió posterior i anterior que porti la motocicleta. Tal i com s'ha justificat en l'apartat 8.1 s'utilitzarà com a geometria de la suspensió posterior el sistema de bieletes "Pro-link", d'aquesta forma es poden aprofitar les equacions del moviment exposades en l'apartat 8.2. Com a sistema de suspensió anterior s'utilitzarà la forquilla telescòpica, ja que aquesta és el sistema més utilitzat en el món de la competició. Apart d'aquests dos conjunts, també s'ha de caracteritzar el xassís, les rodes i la posició de la forquilla respecte el xassís.

Aquesta caracterització ha de tenir en compte varis punts important en la posada a punt de la motocicleta, és a dir, els paràmetres que no estan fixats, aquests són:

- Punt d'ancoratge del basculant al xassís, en les motos de competició de més alt nivell, aquest està unit al xassís mitjançant un sistema de circumferències excèntriques, donant la possibilitat de canviar l'altura del pivot del basculant.
- La llargada del basculant, l'eix de la roda del darrera pot lliscar a través de la puntera del basculant, figura 9-1-1, amb l'objectiu de tensar la cadena en



Figura 9-1-1 Puntera del basculant, permet modificar la longitud d'aquest

les motos de carrer, tot i això en motos de competició, s'allarga o s'escurça aquesta en funció del tipus de traçat del circuit.

- La longitud del conjunt molla amortidor, els amortidors de competició porten una ròtula roscada a l'amortidor i un sistema de femella i contrafemella per fixar-la a aquest. D'aquesta manera es pot regular l'altura del conjunt molla amortidor i canviar de posició el centre d'inèrcies de la moto.
- La longitud de la bieleta i la posició d'aquesta, permet canviar la progressivitat de la suspensió i el comportament durant les acceleracions.
- L'"offset" de les tiges, modificant l'avanç de la moto.
- La distància entre el pla de la tija superior i el pla del tap de la forquilla, aquest paràmetre s'anomena en el món de la competició, l'altura de les forquilles. En la figura 9-1-2 es pot observar com el pla del tap de la forquilla, sobrepassa el pla superior de la tija en 15mm. La distància que els separa és l'altura de la forquilla. D'aquesta manera es regula l'angle d'atac, i com a conseqüència l'avanç, si no es toca res més; i la posició del centre d'inèrcies de la moto.

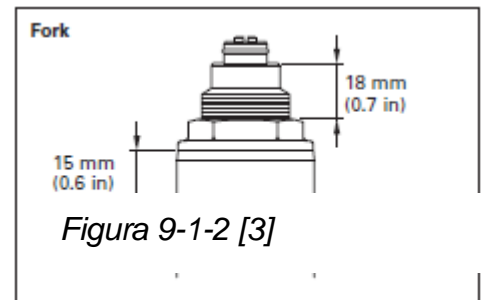


Figura 9-1-2 [3] Altura de la forquilla

9.2. Model utilitzat

Per a tal d'obtenir les equacions del moviment del sistema s'ha treballat en el pla, utilitzant l'esquema de la figura 9-2-1.

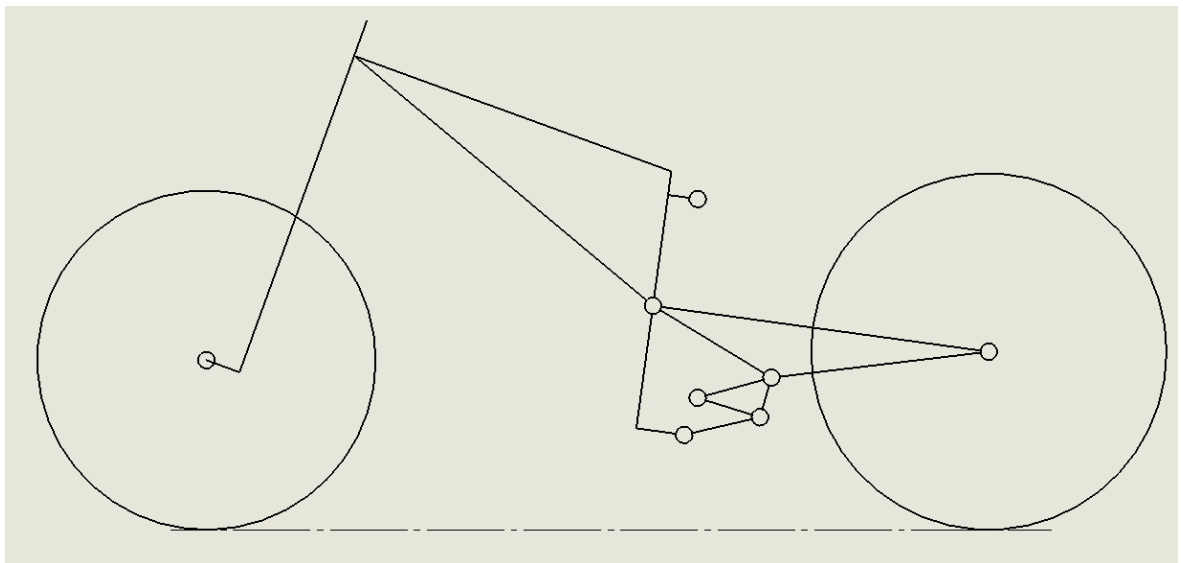


Figura 9-2-1

D'aquesta figura se'n extreuen els següents punts:

- El segment superior del xassís és perpendicular al eix de la pipa de direcció, per tal de facilitar els càlculs.
- Els punts d'ancoratge de les bieletes al xassís i de l'amortidor al xassís són fixos a aquest, i depenen de la posició de les suspensions.

Seguidament passarem a anomenar els paràmetres a imposar per tal de definir-la.

- Suspensió posterior
 - S'han utilitzat els mateixos paràmetres que en l'apartat 8.2, és a dir definint les distàncies $S1$, $S2$, $S3$ pel basculant; $T1$, $T2$, $T3$ pel triangle. Tot i això, degut al moviment del xassís, la forma de definir els punt d'ancoratge de les bieletes al xassís i del amortidor al xassís ha hagut de canviar.
 - S'han utilitzat els mateixos angles per determinar la posició del sistema de suspensió.
- Xassís, figura 9-2-2
 - $X1$ →Mòdul del vector perpendicular a l'eix de la pipa, amb origen el punt d'intersecció de l'eix de les forquilles amb el pla superior de la tija superior, i un punt final, qualsevol de la cartel·la del xassís de fàcil mesura, a poder ser que quedi per darrere del eix del basculant.
 - $X2$ →Distància entre el punt final del segment $X1$, fins al eix del basculant.
 - $X3$ →Distància entre l'eix del basculant i el punt d'intersecció de l'eix de la pipa amb el pla superior de la tija superior.
 - Xm →Distància entre l'eix del basculant i el punt d'intersecció del segment $X2$ amb la recta perpendicular a aquest i que passa pel punt d'ancoratge de l'amortidor al xassís.
 - Ym →Distància entre el punt d'ancoratge del amortidor al xassís fins al punt d'intersecció de la recta perpendicular a $X2$ que passa pel punt d'ancoratge de l'amortidor al xassís.
 - Xb →Distància entre l'eix del basculant i el punt d'intersecció del segment $X2$

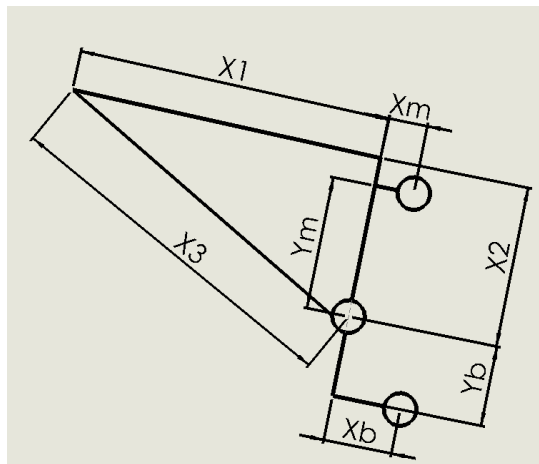


Figura 9-2-2

amb la recta perpendicular a aquest i que passa pel punt d'ancoratge de les bieletes al xassís.

- $Yb \rightarrow$ Distància entre el punt d'ancoratge de les bieletes al xassís fins al punt d'intersecció de la recta perpendicular a $X2$ que passa pel punt d'ancoratge de les bieletes al xassís.

A partir d'aquestes dades es calculen els angles $Xa1$, $Xa2$ i $Xa3$. Aquets igual que en els casos anteriors corresponen: $Xa1$ a l'angle format per $X1$ i $X3$, els altres dos reben nom en senti horari. Equacions 9.2.1, 9.2.2 i 9.2.3:

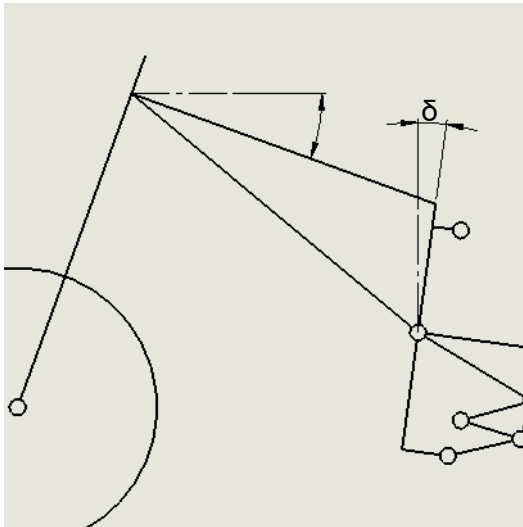
$$Xa1 = \arccos\left(\frac{X1^2 + X3^2 - X2^2}{2 \cdot X1 \cdot X3}\right) \quad (\text{Eq.9.2.1})$$

$$Xa2 = \arccos\left(\frac{X1^2 + X2^2 - X3^2}{2 \cdot X1 \cdot X3}\right) \quad (\text{Eq.9.2.2})$$

$$Xa3 = \pi - Xa1 - Xa2 \quad (\text{Eq.9.2.3})$$

L'orientació del xassís s'ha definit amb dos angles, figura 9-2-3:

- δ , l'angle entre el segment $X2$ i la vertical



- ϵ , l'angle d'avanç

Seguidament es defineix la longitud del conjunt molla amortidor, Lm , i el radi de la roda posterior, Rr .

Finalment s'han definit els paràmetres que defineixen tot el tren davanter: la longitud de les forquilles, Lf , l'altura de les forquilles, Hf , l'"offset", d , i el radi de la roda anterior, Rf .

L'orientació d'aquest queda definida dons per l'angle d'atac de la motocicleta.

Figura 9-2-3

A partir de tots aquests paràmetres obtenim un sistema de 10 equacions no lineals que ens defineixen la geometria de la motocicleta, amb 10 incògnites.

- $\varphi_b \rightarrow$ L'angle que forma el segment del basculant $S1$ amb l'horitzontal
- $\varphi_t \rightarrow$ L'angle que forma el segment del triangle $T3$ amb la vertical.
- $\theta_b \rightarrow$ L'angle que forma la bieleta amb l'horitzontal
- $\epsilon \rightarrow$ L'angle d'atac de les forquilles

- $p \rightarrow$ La distància entre eixos de la moto
- $\delta \rightarrow$ L'angle que forma el segment X2 del xassís amb la vertical
- $ax \rightarrow$ El mòdul de la projecció horitzontal del vector que té per origen l'eix del basculant i per extrem el punt d'ancoratge del amortidor al xassís.
- $ay \rightarrow$ El mòdul de la projecció vertical del vector que té per origen l'eix del basculant i per extrem el punt d'ancoratge del amortidor al xassís.
- $bx \rightarrow$ El mòdul de la projecció horitzontal del vector que té per origen l'eix del basculant i per extrem el punt d'ancoratge de les bieletes al xassís.
- $by \rightarrow$ El mòdul de la projecció vertical del vector que té per origen l'eix del basculant i per extrem el punt d'ancoratge de les bieletes al xassís.

I les 10 equacions següents:

- Suspensió posterior

- Eix x, equació 9.2.4:

$$0 = S3 \cdot \cos(Sa1 + \varphi_b) - T3 \cdot \sin(\varphi_t) + T2 \cdot \sin(\varphi_t + Ta3) - b \cdot \cos(\theta_b) - bx \quad (\text{Eq.9.2.4})$$

- Eix y, equació 9.2.5:

$$0 = -S3 \cdot \sin(Sa1 + \varphi_b) - T3 \cdot \cos(\varphi_t) + T2 \cdot \cos(\varphi_t + Ta3) + b \cdot \sin(\theta_b) + by \quad (\text{Eq.9.2.5})$$

- Longitud de l'amortidor, equació 9.2.6:

$$0 = \sqrt{(ax - (S3 \cdot \cos(Sa1 + \varphi_b) - T3 \cdot \sin(\varphi_t)))^2 + (ay - (-S3 \cdot \sin(Sa1 + \varphi_b) - T3 \cdot \cos(\varphi_t)))^2 - Lm} \quad (\text{Eq.9.2.6})$$

- Geometria de la moto

- Eix x, equació 9.2.7:

$$0 = d \cdot \cos(\varepsilon) + (Lf - Hf) \cdot \sin(\varepsilon) + X1 \cdot \cos(\varepsilon) - X2 \cdot \sin(\delta) + S1 \cdot \cos(\varphi_b) - p \quad (\text{Eq.9.2.7})$$

- Eix y, equació 9.2.8:

$$0 = Rf - d \cdot \sin(\varepsilon) + (Lf - Hf) \cdot \cos(\varepsilon) - X1 \cdot \sin(\varepsilon) - X2 \cdot \cos(\delta) - S1 \cdot \sin(\varphi_b) - Rr \quad (\text{Eq.9.2.8})$$

- Angle delta, equació 9.2.9:

$$0 = \delta - \left(\frac{\pi}{2} - (Xa2 - \varepsilon)\right) \quad (\text{Eq.9.2.9})$$

- Posició enllaç xassís-amortidor

- Eix x, equació 9.2.10:

$$0 = X_m \cdot \sin(\delta) + Y_m \cdot \cos(\delta) - ax \quad (\text{Eq.9.2.10})$$

- Eix y, equació 9.2.11:

$$0 = X_m \cdot \cos(\delta) - Y_m \cdot \sin(\delta) - ay \quad (\text{Eq.9.2.11})$$

- Posició enllaç xassís-bieletes

- Eix x, equació 9.2.12:

$$0 = -X_b \cdot \sin(\delta) + Y_b \cdot \cos(\delta) - bx \quad (\text{Eq.9.2.12})$$

- Eix y, equació 9.2.13:

$$0 = -X_b \cdot \cos(\delta) - Y_b \cdot \sin(\delta) + by \quad (\text{Eq.9.2.13})$$

9.3. Funcionament del programa

En aquest apartat s'explicarà breument el funcionament del programa, si es vol aprofundir més en aquest, s'ha d'anar a l'Annex B, on hi ha el codi sencer.

El codi s'organitza al voltant d'una funció anomenada *geometria_moto*, aquesta calcula les geometries de la moto utilitzant, els paràmetres que prèviament li han set entrats i les equacions del moviment, incloses en un arxiu extern. Per tal d'entrar les dades hi veure les que ja s'han introduït prèviament, s'ha dissenyat la següent interfície, figura 9-3-1, utilitzant l'assistent de Matlab®, "GUIDE".

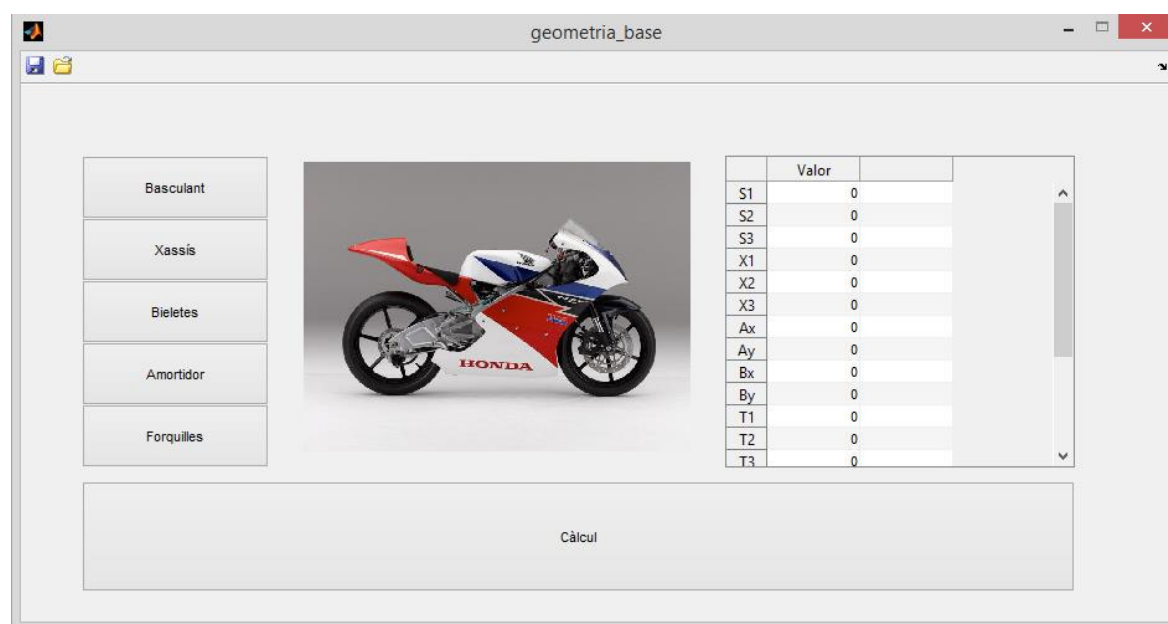


Figura 9-3-1 Pàgina principal de la interfície del programa

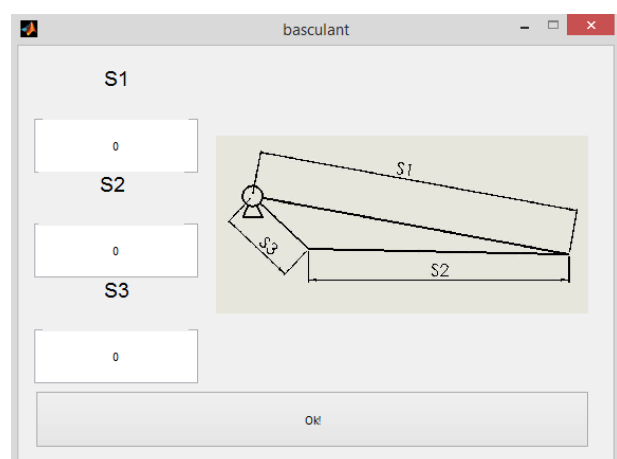


Figura 9-3-2 Interfície basculant

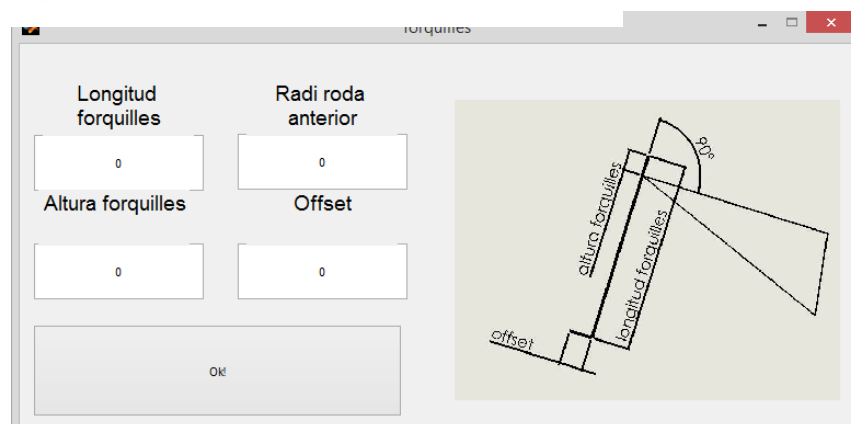


Figura 9-3-3 Interfície forquilles

En la figura 9-3-1, és veu la pàgina principal de la interfície del programa. En aquesta es pot observar a dalt de tot a l'esquerra, l'existència de dos botons, un per guardar la geometria que s'està utilitzant en el moment i un per carregar una geometria introduïda anteriorment. A sota d'aquests dos es pot veure tot un seguit de botons amb els noms de les parts de les quals volem introduir una geometria nova o modificar-ne una d'existents. Al

pitjar cada un d'aquests botons, el programa portarà a la seva interfície relacionada, en l'exemple del basculant ens portarà a la figura 9-3-2, i en el de les forquilles a la 9-3-3.

En aquestes dues interfícies s'observen tot

el conjunt de paràmetres, definits en l'apartat 9.2 i explicats amb un esquema a la imatge de la dreta dels quadres de text, que descriuen l'element que es vol introduir o modificar, en el cas de les dues imatges anterior, els valors d'aquests són 0, ja que s'introdueix una geometria nova. Si es volgués modificar, els quadres de text prendrien per valor la geometria existent. A sota d'aquests quadres de text es veu un boto on es pot llegir *Ok!*. Al posar-lo, la interfície actual es tancarà, mostrant un altre cop la pantalla principal, però amb els valors introduïts en la taula de la dreta.

A sota de tot de la figura 9-3-1 s'observa un boto que diu calcula, aquest al ser pitjat executa la funció *geometria_moto*, amb les dades mostrades a la taula. Primer de tot, calcula els angles del basculant, del triangle i del xassís utilitzant la funció *angle_triangle*, vista en l'apartat 8.3. Seguidament imposa un vector de condicions inicials per a començar iterar, *x0* i un vector resultats mínims, *lb*, aquest s'ha hagut de crear, per tal de limitar les infinites solucions que presenten el sinus i el cosinus, figura 9-3-4. En aquesta figura es veu també, en color verd, a quin paràmetre correspon cada posició dels vectors *x0*, *lb*. Seguidament utilitza la funció *lsqnonlin*. Una funció que resol sistemes no lineals amb restriccions utilitzant el mètode dels mínims quadrats [4].

```
%x(1)=angle basculant;x(2)=angle triangle;x(3)=angle
%bieleta;x(4)=epsi;x(5)=p;x(6)=delta;x(7)=xm;x(8)=ym;x(9)=xb;x(10)=yb;
x0=[0.1022,0.1204,1.264,0.6237,1121,0.243,135.53,172.43,11.3,162.04];
lb=[-0.1745,-0.1745,-1.458,0.3141,1000,-0.349,-10,-10,-10,-10];
```

Figura 9-3-4 Vector *x0*, vector *lb* i en verd valor corresponent a cada posició del vector

```
x0=lsqnonlin('equacions_geometria',x0,lb);
fib=x0(1);
fit=x0(2);
thetab=x0(3);
epsi=x0(4);
p=x0(5);
delta=x0(6);
xm=x0(7);
ym=x0(8);
xb=x0(9);
yb=x0(10);
```

Figura 9-3-5

Els valors trobats són ordenats en el mateix ordre i substitueixen els valors del vector *x0*. Aquests per tal de facilitar els següents passos, són anomenats per el seu nom propi, figura 9-3-5.

A continuació utilitzant els paràmetres imposats i les solucions trobades es fa un dibuix de la solució, la qual permet comprovar la validesa dels

resultats Aquest es realitza utilitzant la funció *dibuixa* [4], la qual permet visualitzar en una gràfica vectors o segments indicant només el punt d'origen, l'extrem i el gruix que es vol de la línia.

Un cop acabada la funció càlcul, s'obre la interfície resultats. En aquesta es calcula l'avanç normal, l'avanç lineal al terra, l'avanç normal posterior i es passa l'angle del basculant i l'angle d'avanç a graus. Seguidament es mostren en pantalla aquests valors i la batalla.

Finalment apareixen els resultats de la següent forma, figura 9-3-7 i 9-3-8.

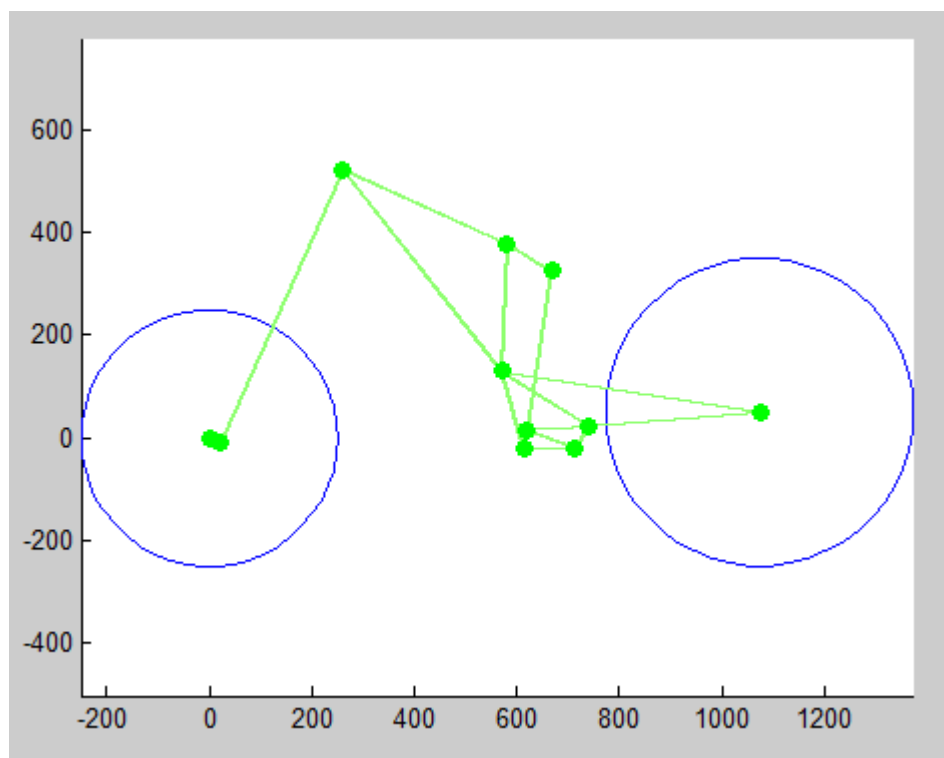


Figura 9-3-7 Esquema del resultat final

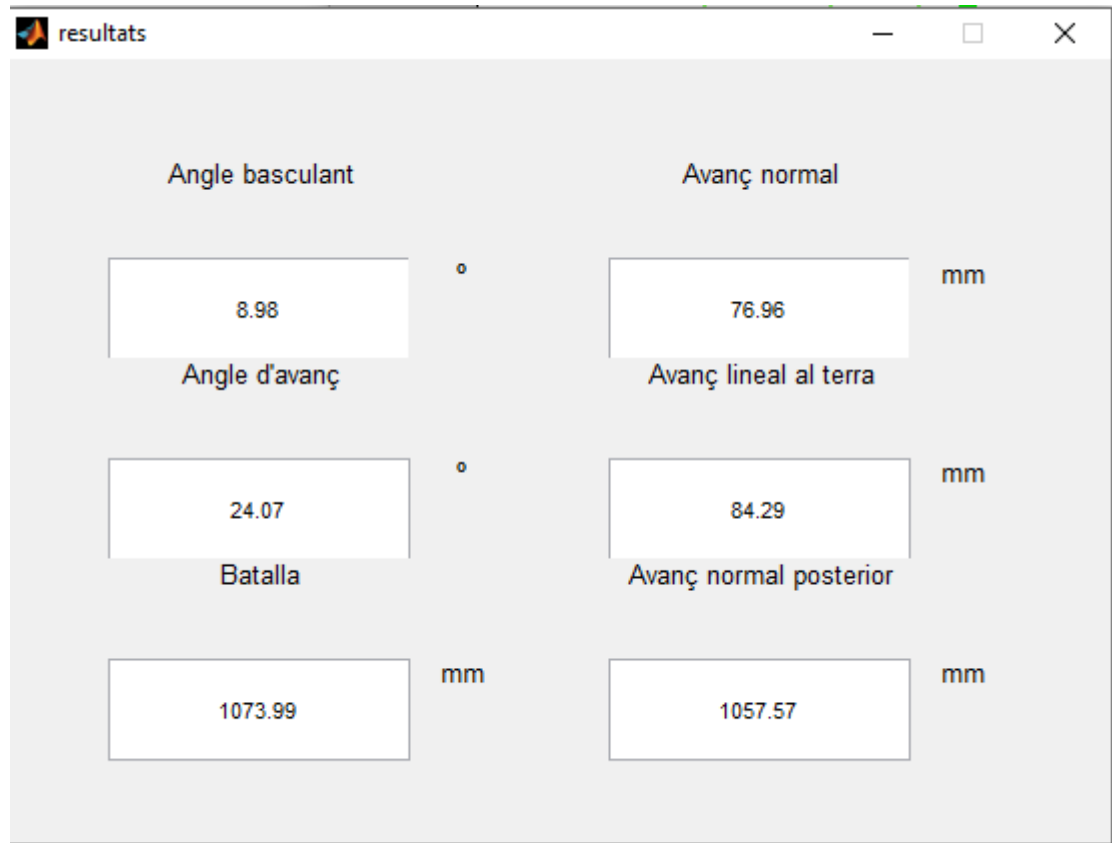


Figura 9-3-8 Paràmetres geomètrics resultants

9.4. Comparativa dels resultats

Per tal de validar el funcionament s'ha comparat utilitzant unes mesures qualsevols, similars a les d'una de poca cilindrada de SSP300, el programa dissenyat amb les mesures imposades en el Solidworks®.

Les mesures han sigut les de la taula següent, taula 9.4.1:

Taula 9.4.1

Paràmetre	Valor [mm]
<i>S1</i>	510
<i>S2</i>	335
<i>S3</i>	200
<i>X1</i>	595,93
<i>X2</i>	107,84
<i>X3</i>	632,22
<i>ax</i>	40
<i>ay</i>	150
<i>bx</i>	50
<i>by</i>	150
<i>T1</i>	50
<i>T2</i>	105
<i>T3</i>	110
<i>b</i>	140
<i>Lm</i>	320
<i>Rr</i>	296,4
<i>Lf</i>	600
<i>Hf</i>	25
<i>Rf</i>	287,5
<i>d</i>	30

Finalment com a resultats hem obtingut, taula 9.4.2 i figura 9-4-1:

Taula 9.4.2

Paràmetre	Solidworks	Matlab	Error	Percentatge d'error
Angle basculant	16,60°	16,60°	0	0%
Avanç normal	90,14mm	90,14mm	0mm	0 %
Avanç lineal al terra	99,20mm	99,21mm	0,01mm	0,01%
Avanç normal posterior	1252,33mm	1252,33mm	0mm	0%
Batalla	1279,24mm	1279,23mm	0,01mm	0%
Angle d'avanç	24,70°	24,70°	0°	0%

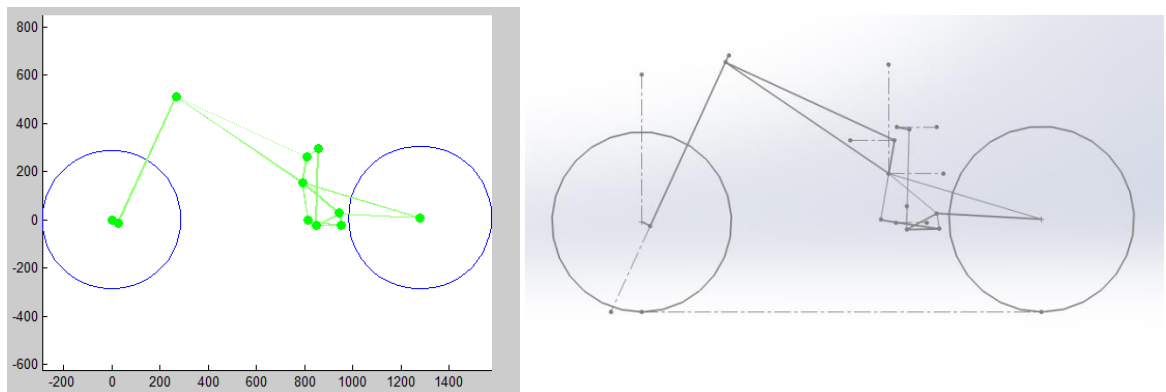


Figura 9-4-1 Comparativa de resultats. A l'esquerra programa amb Matlab®, a la dreta comparativa amb el Solidworks®

La diferència més gran mostrada no arriba ni al 1% de la mesura nominal d'aquesta, per tant es pot dir que el programa és totalment fiable.

Si considerem el procés de frenada màxima un cop acabat el transitori del moviment de capcineig, quasi tota la càrrega ja en la roda anterior, sense que la roda posterior es desenganxi del terra i una carrera de les forquilles de 100, simplement imposant una longitud de la forquilla 100mm menors, és a dir $L_f=500\text{mm}$ en el nostre cas obtenim, figura 9-4-2.

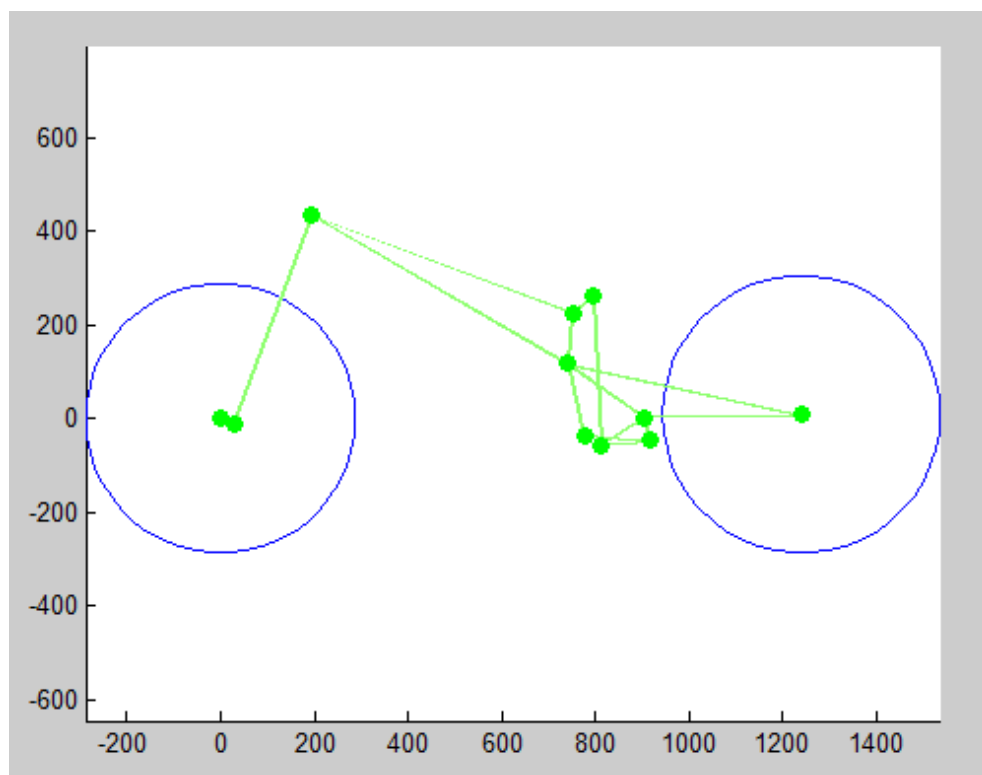


Figura 9-4-2

Paràmetre	Moviment Rectilini Uniforme	Frenada	Diferència (valor absolut)	Percentatge de diferència respecte l'original
Angle basculant	16,60°	12,40°	4,2°	25,30%
Avanç normal	90,14mm	70,69mm	19,45mm	21,58%
Avanç lineal al terra	99,21mm	75,47mm	23,74mm	23,93%
Avanç normal posterior	1252,33mm	1232,28mm	20,05mm	1,60%
Batalla	1279,23mm	1240,13mm	39,10mm	3,06%
Angle d'avanç	24,70°	20,50°	4,20°	17,00%

Taula 9.4.3

Així doncs es veu que durant una frenada amb les condicions explicades anteriorment, el canvi de l'avanç es molt important, fent que canviï el comportament de la motocicleta a en el moment d'inscriure el vehicle a la corba. Això, com s'ha vist anteriorment, comporta un augment de l'agilitat de la moto a canvi d'una disminució de l'estabilitat d'aquest.

10. Possibles millores a realitzar

En aquest apartat s'exposaran les millores a realitzar i perquè no s'han aplicat en aquest treball, cal a dir també, que moltes d'aquestes han sorgit després de la realització d'aquest

- Càlcul de paràmetres dinàmics de les suspensions, com ara l'altura lliure al terra quan a la massa de la moto se li suma la del pilot.
- Càlcul de comportament de la moto en acceleracions i frenades.
- Càlcul de la geometria de la moto en corba

Aquest tres punts no s'han perquè sortien de l'abast del treball, la cinemàtica de la motocicleta en pla vertical de la moto. En el segon punt de la moto, es complicaria més tot ja que s'hauria de parametritzar el comportament dels amortidors i els canvis que es poden realitzar en aquests.

- Lectura de fitxers extrets mitjançant un sistema d'adquisició de dades de forma que es permeti llegir els canvis geomètrics de la moto durant el funcionament d'aquesta.

Aquest punt no s'ha realitzat degut a la gran quantitat de paràmetres que influeixen en aquesta, és a dir, s'hauria de tenir en compte la inclinació de la moto, i aleshores ja no treballem en el pla vertical; a més a més, la majoria de sistemes d'adquisicions de dades no tenen registrat l'angle de direcció.

11. Pressupost

El pressupost s'ha establert utilitzant les següents hipòtesis:

- La possessió d'un ordinador prèviament amortitzat
- La llicència de Matlab® utilitzada es proveïda per la universitat
- Preu de l'hora 35€ bruts/hora
- 160hores de desenvolupament dels dos programes
- ETC FIM CEV i SSP300 RFME 2 pilots per telemètric
- Moto3 FIM CEV Repsol i WSSP300 1 pilot per telemètric
- Venda al 75% dels telemètrics de les competicions anomenades
- Dades de pilots de la temporada 2016-2017

Taula 11.1

	Preu/unitat	Unitats	Cost
Llicència Matlab®	0,00€/llicència	1 llicència	0,00€
Enginyeria	35,00€/hora	160 hores	5600€
Total			5600€

El cost total trobat a la taula 11.1 és de 5600€. El preu de venda serà de 80€ la llicència, tal i com es pot veure a la Taula 11.2.

Competició	Nombre de pilots	Pilots telemètric per	Total telemètrics
ETC FIM CEV Respol	31 pilots	2pilots/telemètric	15,5 Telemètrics
Moto3 FIM CEV Repsol	38 pilots	1 pilot/telemètric	38 Telemètrics
SSP300 RFME	13 pilots	2 pilots/telemètric	6,5 Telemètrics
WSSP300 RFME	33 pilots	1 pilots/telemètric	33 Telemètrics
Total			93 Telemètrics
Vendes	75% telemètrics		70 (69,75) Telemètrics
Cost Programa			80€/llicència

Taula 11.2

Així doncs el programa surt 19€ més barat que el de la competència i amb l'avantatge de que es pot modificar el software per obtenir altres paràmetres simplement avisant al administrador d'aquest.

12. Anàlisi d'impacte ambiental

Per tal de realitzar l'anàlisi d'impacte ambiental s'han utilitzat les dades obtingudes de la ETC al circuit de Motorland, el circuit del campionat on es passen els pilots més estona amb el puny del gas obert al màxim. El consum per volta surt de 0,38l/volta i hi ha un total de 6 entrenaments lliures de 40 minuts cada un amb l'objectiu de posar la moto apunt. Si suposem que un cop la moto és a punt i aconseguix els temps, aquesta entra al box, i que amb l'ajut dels dos programes és pot accelerar la posada a punt un 25%.

- Total de minuts posada a punt 240min
- Total de minuts posada a punt mitjançant el programa 180min
- Suposant que la mitja de temps en totes les voltes realitzades és de 2 minuts 05 segons/volta, és a dir 2,08 minuts/volta, obtenim una diferència de 28,8 voltes que es deixen de realitzar, 10,94 litres de gasolina.

Així doncs utilitzant el programa s'estalvia un 12% de combustible, i per tant és un 12% menys de gasos nocius que s'emeten, aproximadament 0,46g de CO₂ estalviats.

Conclusions

Finalment es pot concloure que per tal de definir la geometria d'una moto són necessaris els següents paràmetres: l'avanç lineal al terra o l'avanç normal, l'avanç normal posterior, la batalla i l'angle de llançament. Aquests varien al llarg del recorregut de les suspensions. Tot i això, només ens donen una idea del comportament en general que tindrà la moto, ja que per saber-lo del tot es necessitaria saber inèrcies, masses i la posició del centre d'inèrcia de la motocicleta.

Els paràmetres imposats per a definir el xassís, basculant, les bieletes, el triangle, l'amortidor i tot el tren davanter són de mesura fàcil i directa. Tot i això aquestes poden presentar errors de mesura en funció de com es prenguin.

El model matemàtic utilitzat per descriure la geometria de la moto ha estat el correcte, degut al poc error que presenta. Aquest es basa en la definició de les mesures del tren davanter, el xassís, el basculant, el sistema de suspensió "*Pro-link*" i el radi de les rodes. A partir d'aquí s'han pogut extreure'n les equacions a solucionar.

El model matemàtic utilitzat per a descriure la geometria i la progressivitat del sistema de suspensió anterior ha estat el correcte. Definit com el basculant, el triangle, el conjunt molla-amortidor i els punts d'ancoratge al xassís de les bieletes i el conjunt molla-amortidor al xassís respecte al punt d'ancoratge del basculant al xassís. Així com l'obtenció d'un polinomi de grau 2 que permeti relacionar la posició del potenciòmetre amb la longitud del conjunt molla-amortidor.

El programa d'anàlisi de la geometria permet calcular l'avanç lineal al terra, l'avanç normal, l'avanç normal posterior, la batalla, l'angle de llançament i l'angle del basculant. Aquests es poden obtenir per a qualsevol moment de funcionament del vehicle, sempre i quan estigui en el pla, si s'utilitza un sistema d'adquisició de dades on s'obtinguin les posicions de les forquilles i del conjunt molla amortidor posterior i s'introdueixen en aquest.

Els dos programes matemàtics es poden utilitzar perfectament per a definir la geometria i la suspensió posterior de tipus "*Pro-link*" en una motocicleta de baixa cilindrada. Estalviant d'aquesta manera gasolina i l'emissió de gasos nocius a un preu molt econòmic.

Agraïments

Finalment agrair al tutor d'aquest treball, Lluís Roger Casals, per tot el material aportat sobretot en termes de normativa ISO per la nomenclatura.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] VITORE COSSALTER, *Motorcycle Dynamics*. Leipzig: AMAZON® 2006
- [2] TONY FOALE, *Motorcycle Handling and chassis design, the art and science* Espanya: 2002.
- [3] HONDA RACING COMPANY, *2012-NSF250R*. Japó: 2011
- [4] MATHWORKS. GUIA DE FUNCIONS [<https://es.mathworks.com/>], Durant tot el procés de programació, Octubre de 2017 a Desembre de 2017]
- [5] JOHN BRADLEY, *The Racing Motorcycle, A technical guide for constructors*. Vol.(1) York 1996
- [6] ARIAS PAZ, *Motocicletas*, Madrid: CIE DOSSAT 2000, 2003

Bibliografia complementària

- [7] ISO 6725:1981: Road vehicles -- Dimensions of two-wheeled mopeds and motorcycles
-- Terms and definitions Terminologia
- [8] ISO 6726:1988: Mopeds and motorcycles with two wheels – Masses – Vocabulary
Terminologia
- [9] ISO 8855:1991 (UNE 26517:2006): Road vehicles – Vehicle Dynamics and road-
holding ability -- Vocabulary Terminologia